АБРАЗИВНАЯ и АЛМАЗНАЯ обработка материалов

СПРАВОЧНИК

6П4.6
А16
УДК 621.921 + 621.921.34 (0

Авторский коллектив: А. Н. Резников, Е. И. Алексенцев, Я. И. Барац, В. Л. Белостоцкий, Н. В. Будник, Ю. П. Бурочкин, Г. М. Гаврилов, М. В. Гомельский, А. В. Гордеев, В. И. Дрожжин, Н. П. Згонник В. П. Зубарь, З. И. Кремень, Н. М. Мурахтанова, В. И. Муцянко, С. В. Николаев, И. С. Ногин, В. И. Пилинский, К. И. Русаков, В. А. Рыбаков, Ф. Ю. Сакулович, А. Г. Саркисов, М. Ф. Семко, Ф. П. Урывский, О. Б. Федосеев, Л. Н. Филимонов, И. Е. Фрагин, Л. В. Худобин, А. В. Шеин, В. В. Щипанов, Г. Г. Яшин.

Рецензент инж. Г. М. Ипполитов

А16 **Абразивная и алмазная обработка материалов.** Справочник. Под ред. д-ра техн. наук проф. А. Н. Резникова. М., «Машиностроение», 1977

391 с. с ил.

На обороте тит. л. авт.: Е. И. Алексенцев, Я. И. Барац и др.

Справочник содержит основные данные о различных видах абразивного и алмазного инструмента, его конструкции и особенностях эксплуатации, а также о различных методах абразивной и алмазной обработки. Приведены практические рекомендации по эффективному использованию шлифовальных кругов с зернами из абразивов, алмазов и других современных сверхтвердых материалов.

Справочник предназначен для инженерно-технических работников машиностроительных заводов.

А $\frac{31207\text{-}103}{038(01)\text{-}77}$ 103-77 6П4.6

© Издательство «Машиностроение», 1977 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Решениями XXV съезда КПСС поставлены задачи повышения эффективности производства и качества изделий в различных отраслях народного хозяйства. В машиностроении одним из путей реализации этих задач является все более широкое применение обработки деталей абразивными, алмазными и другими инструментами из современных сверхтвердых материалов. Абразивно-алмазная обработка позволяет обеспечить требуемые точность и качество деталей при высокой производительности, а значит, обеспечить высокую надежность и долговечность машиностроительной продукции в процессе эксплуатации, поэтому объем и роль отделочных операций в современном машиностроении непрерывно возрастают.

Освоение промышленностью производства синтетических сверхтвердых материалов, таких как алмаз, эльбор, кубонит и др., открыло новые перспективы усовершенствования технологии изготовления разнообразных изделий.

В настоящее время испытаны и внедрены такие процессы, как заточка твердосплавного инструмента алмазными кругами, тонкое точное шлифование направляющих станин и других корпусных деталей, алмазное хонингование направляющих станин и других деталей, алмазное хонингование и притирка отверстий, шлифование закаленных ходовых винтов качения и скольжения, заточка разверток, метчиков, червячных и концевых фрез.

Внедрение новых технологических процессов подчинено общей задаче дальнейшего повышения качества изделий при обеспечении высокой эффективности работы.

В справочнике сконцентрированы сведения о свойствах и оптимальных методах использования абразивов, а также современных естественных и синтетических сверхтвердых материалов, применительно к типовым операциям по обработке металлических, твердосплавных и других деталей в машиностроении, конструкции кругов; систематизированы материалы, опубликованные в стандартах, отраслевых нормалях и в технической литературе, а также обобщен опыт отечественных и зарубежных предприятий и научных учреждений. Приведены результаты новых исследований, выполненных участниками авторского коллектива.

Наряду с изложением отечественного и зарубежного производственного опыта авторы сочли необходимым привести материалы по теории процессов абразивно-алмазной обработки, поскольку без понимания физики процессов невозможны грамотная их оптимизация и рациональное применение.

В справочнике приведены методы экономической оценки вариантов абразивно-алмазной обработки и укрупненные данные для расчета эффективности применения тех или иных современных инструментальных материалов.

Авторы надеются, что материалы справочника могут быть использованы для повышения эффективности абразивно-алмазной обработки и качества деталей, а также будут полезны для дальнейших исследований, имеющих цель внести определенный вклад в дело решения общих задач, поставленных в новом пятилетии перед машиностроителями страны.

Глава I

МАТЕРИАЛЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО И АЛМАЗНОГО ИНСТРУМЕНТА

§ 1.1. Абразивные материалы

В практике обработки материалов резанием обычно используют термин «абразивы», охватывающий широкую гамму материалов не только высокой твердости, но и некоторые сравнительно мягкие материалы (шлаки, глинозем, крокус, окись хрома, графит, трепел пемза и др.). К абразивам относят также металлическую крошку, представляющую собой зерна различных твердых сплавов, отбеленного чугуна и др Абразивные материалы в виде зерен и порошков различной крупности применяют для изготовления шлифовального инструмента, а также используют в свободном состоянии при шлифовании, полировании и других видах окончательной обработки.

Природными (естественными) абразивными материалами, имеющими промышленное значение, являются корунд, наждак, гранат, кремень и др.

Корунд — горная порода, состоящая в основном из кристаллической окиси алюминия Al_2O_3 с небольшой примесью кварца и других минералов, химически связанных с окисью алюминия. Количество и состав примесей определяют цвет корунда: красный, бурый, желтый, синий. серый, белый. Твердость корунда по шкале Мооса 9,0. Примеси, будучи менее твердыми. чем сам корунд. снижают его абразивную способность.

Наждак — мелкозернистая горная порода, состоящая в основном из корунда, магнетита, гематита и кварца в различных соотношениях (содержание корунда достигает 30%). Цвет наждака черный, красновато-черный, серо-черный Из наждака изготовляют шлифзерно для производства мельничных жерновов; его применяют также для шлифования свободным зерном.

Гранат — минерал, представляющий собой соединение алюминия, железа, хрома, кальция, магния, марганца с кремнекислотой. К гранатам относится большая группа сложных силикатов, кристаллизующихся в кубической сингонии. Они имеют стеклянный блеск и раковистый излом. В зависимости от примесей гранат бывает темно-красного (пироп), красного (альмандин), оранжево-желтого (спессартин), медно-желтого (гроссуляр), буро-красного, черного (андрадит) или изумрудно-зеленого (уваровит) цвета. В качестве естественных абразивных материалов используют гранаты. представляющие собой изоморфную смесь альмандина, пиропа, спессартина и других разновидностей.

В промышленных рудах содержится 6—15% граната, а в концентратах 45—90%. Из концентратов получают шлифзерно и шлифпорошки. Шлифзерно используют для изготовления шлифовальной шкурки, применяемой при обработке дерева, пластмассы, кожи. Порошки граната применяют в свободном виде для обработки стекла.

Кремень — однородная плотная горная порода, состоящая из кремнезема (халцедона) скрытокристаллической структуры и микроскопических зерен кварца с примесью карбонатов глинистых веществ и органических остатков. Цвет его от светло-серого до черного, иногда с буровато-желтыми оттенками, излом раковистый, благодаря чему при дроблении кремния образуются частицы с острыми кромками. В природе кремень встречается в виде массивных горных пород и гальки.

Для производства шлифматериалов используют кремень, содержащий не менее 96% SiO_2 и не более 1% CaO Кремень применяют в виде зерна и порош-

ков для изготовления шлифовальной шкурки для обработки кожи, эбонита, дерева.

Искусственными абразивными материалами являются карбид бора, карбид кремния, электрокорунд, техническое стекло и другие материалы. Искусственные абразивные материалы, обладая большей стабильностью физико-механических свойств, чем природные, резко ограничили применение последних, а в ряде случаев вытеснили их.

Карбид бора — абразивный материал, получаемый восстановлением в электрической печи борного ангидрида (технической борной кислоты) углеродом (нефтяным коксом). Продуктом синтеза является материал, состоящий из кристаллического карбида бора и небольшого количества примесей бора, графита и других элементов. Формула карбида бора $B_4C(B_{12}C_{13})$. Карбид бора является фазой переменного состава. Содержание B_4C в шлифовальных материалах карбида бора не превышает 93%. Куски карбида бора представляют собой плотную мелкокристаллическую частично сплавленную массу серовато-черного цвета, имеющую раковистый излом. По твердости (по шкале Мооса равна 9,32) карбид бора уступает только алмазу и эльбору, но он весьма хрупок, особенно в частицах крупного размера, поэтому его перерабатывают только на шлиф- и микропорошки

Карбид бора в виде порошков и паст применяют главным образом для доводки инструмента из карбидовольфрамовых и карбидотитановых сплавов.

Карбид кремния — абразивный материал, представляющий собой химическое соединение кремния с углеродом (SiC), его твердость по шкале Мооса равна 9,1. Получают его в электрических печах сопротивления силицированием частиц углерода парами кремниевой кислоты. Сырьем для получения SiC служат материалы, богатые кремнеземом: жильный кварц, кварцевые пески и кварциты, содержащие не менее 99,0—99,5% SiO_2, и углеродистые материалы: нефтяной кокс и антрацит. Для улучшения хода реакции к шихте добавляют некоторое количество опилок, а при производстве зеленого карбида кремния и поваренную соль. Нагревательным элементом печи является токопроводящий керн из углеродистых материалов. Карбид кремния образуется при температуре 1800—2100° С.

Хрупкость карбида кремния является следствием свойств его кристаллической структуры и сочетается в нем с высокой твердостью. Химически чистый карбид кремния бесцветен и прозрачен, технический карбид кремния имеет цвет от светло-зеленого до черного в зависимости от состава и содержания примесей.

Для абразивной обработки промышленность производит два вида карбида кремния: зеленый и черный. По химическому составу и физическим свойствам зеленый и черный карбиды кремния отличаются незначительно, однако зеленый карбид кремния содержит меньше примесей, имеет несколько повышенную хрупкость и большую абразивную способность.

Из карбида кремния получают шлифзерно, шлиф- и микропорошки, которые применяют для изготовления абразивного инструмента на твердой и гибкой основе, а также для паст. Абразивный инструмент из зеленого карбида кремния используют для тонкого шлифования металлообрабатывающего инструмента, твердых сплавов, керамики, камня и для правки шлифовальных кругов. Инструмент из черного карбида кремния идет на шлифование твердых сплавов, чугуна, цветных металлов, стекла, пластмасс, кожи и резины. Пасты из карбида кремния применяют для доводочных работ. Отдельные разновидности карбида кремния используют в электротехнической, металлургической и других отраслях промышленности.

Электрокорунд — абразивный материал, состоящий из корунда и небольшого количества примесей. Промышленность производит несколько разновидностей электрокорунда, в том числе нормальный, белый, хромистый, титанистый, циркониевый, монокорунд и сферокорунд.

Нормальный электрокорунд содержит 92—95% корунда Al_2O_3 и небольшое количество шлака и ферросплава. В зависимости от состава и количества примесей изменяются цвет корунда (от светлого до темно-коричневого), а также его структура и свойства. Нормальный электрокорунд получают в дуговых

печах восстановительной плавкой шихты, состоящей из высокосортного боксита, малозольного углеродистого материала и железной стружки. В процессе плавки примеси, содержащиеся в боксите, восстанавливаются и переходят в ферросплав, кроме CaO которая почти целиком переходит в электрокорунд, создавая вредные минеральные образования, снижающие его качество. По этой причине содержание CaO в боксите должно быть минимальным.

Высокая твердость и механическая прочность зерен нормального электрокорунда обеспечивают широкое применение его при шлифовании металлов. Нормальный электрокорунд обладает также значительной вязкостью, которая необходима при выполнении работ с переменными нагрузками. Для изготовления кругов, применяемых для обдирочного шлифования, используют электрокорунд поликристаллического строения, обладающий высокой прочностью. Размер кристаллов в таком материале в среднем составляет 50 мкм. Из нормального электрокорунда получают шлифзерно, шлифпорошки и микропорошки различных размеров, которые используют для изготовления разнообразных инструментов.

Белый электрокорунд состоит из 98—99% корунда и небольшого количества примесей (1—2%) в виде высокоглиноземного алюмината натрия и других минералов. Белый электрокорунд получают расплавлением глинозема (чистой окиси алюминия) в дуговой печи. По химическому и физическому составам белый электрокорунд является более однородным, чем нормальный. Зерна белого электрокорунда обладают высокой твердостью, прочностью и имеют острые кромки; они легко внедряются в твердые прочные металлы, меньше выделяют тепла при обработке, чем зерна других разновидностей электрокорунда. Из белого электрокорунда получают шлифзерно, шлиф- и микропорошки в широком диапазоне крупностей, которые применяют для изготовления абразивного инструмента на различных связках, а также шлифовальной шкурки.

Хромистый электрокорунд — абразивный материал, получаемый в дуговой печи плавкой глинозема с добавкой окиси хрома (до 2%); по цвету он напоминает рубин. Наличие в этом корунде твердого раствора хрома существенно меняет его микроструктуру и свойства: повышает механическую прочность и абразивную способность зерна по сравнению с белым электрокорундом. При увеличении содержания окиси хрома, растворенной в корунде, повышается интенсивность его окраски, механическая прочность зерна уменьшается, а абразивная способность возрастает [74].

Абразивный инструмент из хромистого электрокорунда обеспечивает повышение производительности при шлифовании конструкционных и углеродистых сталей на интенсивных режимах работы на 20—30% по сравнению с инструментом из электрокорунда белого.

Хромистый электрокорунд выпускают в виде шлифзерна и шлифпорошков, применяемых для производства абразивного инструмента на различных связках, а также шлифовальной шкурки.

Титанистый электрокорунд — абразивный материал, представляющий собой соединение окиси алюминия с окисью титана ($Al_2O_3 + TiO_2$). Титанистый электрокорунд отличается от нормального электрокорунда большей вязкостью. В нем отсутствуют ферросплав и ряд вредных примесей. По микроструктуре титанистый электрокорунд аналогичен электрокорунду нормальному, выплавленному из высокосортного боксита. Титанистый электрокорунд выпускают в виде шлифзерна и шлифпорошков; он предназначен для изготовления абразивного инструмента, применяемого при обработке углеродистых, конструкционных и других закаленных и незакаленных сталей.

Циркониевый электрокорунд представляет собой абразивный материал, получаемый в электрической дуговой печи при плавке шихты, в состав которой входит глинозем, циркониевый концентрат с содержанием до 60% ZrO_2 или чистая двуокись циркония. Зерно из циркониевого электрокорунда применяют в основном для изготовления кругов для обдирочного шлифования и шлифования с высокими скоростями.

Монокорунд — абразивный материал, который получают в электродуговых печах сплавлением боксита с сернистым железом и восстановителем. В результате плавки получается блок, состоящий из оксисульфидного шлака, представ-

Таблица 1.1

Насыпная масса монокорунда

Зернистость	Насыпная масса, г/см³	Зернистость	Насыпная масса, г/см³	Зернистость	Насыпная масса, г/см³
125	1,81 ± 0,05	40	1,91 ± 0,05	12	2,01 ± 0,05
100	1,83 ± 0,05	32	1,93 ± 0,05	10	2,03 ± 0,05
80	1,85 ± 0,05	25	1,95 ± 0,05	8	2,05 ± 0,05
63	1,87 ± 0,05	20	1,97 ± 0,05	6	2,07 ± 0,05
50	1,90 ± 0,05	16	1,99 ± 0,05	5	2,09 ± 0,05

ляющего собой зерна корунда, сцементированные сульфидами алюминия, кальция и, частично, титана. При выщелачивании шлака теплой водой зерна освобождаются от сульфидов алюминия и кальция, материал распадается на мелкие монокристальные частицы, которые подвергаются магнитному, химическому и гравитационному обогащению, прокалке, после чего классифицируются по крупности рассевом на ситах.

Зерна монокорунда имеют изометрическую форму, высокую механическую прочность и насыпную массу; в процессе шлифования они скалываются, что обеспечивает высокие режущие свойства кругов и небольшие силы резания.

Монокорунд выпускают в виде шлифзерна и шлифопорошков различной крупности, которые идут на изготовление абразивного инструмента для шлифования труднообрабатываемых легированных сталей и сплавов. В табл. 1.1 приведена зернистость монокорунда и насыпная масса зерна для каждой зернистости. Насыпная масса — величина, аналогичная плотности веществ применительно к сыпучим материалам, представляет собой массу порошка данной зернистости в единице объема.

Сферокорунд — абразивный материал, получаемый из глинозема в виде полых корундовых сфер. В нем содержится более 99% Al_2O_3 и небольшое количество примесей. Абразивные инструменты, изготовляемые из сферокорунда на различных связках, эффективно применяют для обработки мягких и вязких материалов: кожи, резины, пластмассы, цветных металлов и др. В процессе шлифования сферы разрушаются и обнажают острые режущие кромки, что обеспечивает более производительное шлифование при небольшом тепловыделении.

Сферокорунд применяют также при изготовлении некоторых видов огнеупорных деталей. Теплопроводность таких деталей в 2 раза ниже труднообрабатываемых литых малопористых огнеупоров. Некоторые свойства сферокорунда приведены в табл. 1.2.

Техническое стекло. Бой листового и бутылочного стекла является сырьем, из которого в результате дробления, измельчения и рассева получают шлифзерно и шлифпорошки, применяемые для изготовления шлифовальной шкурки, предназначенной для обработки дерева.

Сведения об основных физико-механических свойствах природных и искусственных абразивных материалов приведены в табл. 1.3.

В табл. 1.4 приведены обозначения абразивных материалов по ТУ 036-57—69 и новые обозначения по данным ВНИИАШ.

Таблица 1.2

Физико-механические свойства сферокорунда

Зернистость	Прочность на раздавливание, г/зерно	Насыпная масса, г/см³	Средняя толщина стенки, мкм	Зернистость	Прочность на раздавливание, г/зерно	Насыпная масса, г/см³	Средняя толщина стенки, мкм
50	140—390	0,99—1,42	30—60	100	360—1000	0,85—1,20	60—140
63	210—530	0,92—1,32	30—80	125	550—1540	0,72—1,23	70—140
80	310—710	0,86—1,24	40—100	160	890—2300	0,72—1,24	80—190
				200	1210—2540	0,71—1,24	100—220

Таблица 1.3

Основные физико-механические свойства абразивных материалов

Абразивный материал	Происхождение	Микротвердость кгс/мм²	Плотность, г/см³	Абразивная способность зерна № 16 по стеклу	Насыпная масса г/см³		Теплоустойчивость, °С
					зерна № 16	зерна № 40	
Карбид бора	Искусственный	4000—4500	2,5 ±0,02	0,500	1,04 ±0,05	—	700—800
Карбид кремния:							
зеленый	»	3300—3600	3,20 ±0,05	0,450	1,48 ±0,05	1,48 ±0,05	1300—1400
черный	»	3300—3600	3,20 ±0,05	0,400	1,48 ±0,05	1,48 ±0,05	1300—1400
Электрокорунд:							
нормальный	»	1900—2000	3,90 ±0,05	0,145	1,76 ±0,05	1,87 ±0,05	1700—1800
белый	»	2000—2100	3,95 ±0,05	0,155	1,73 ±0,05	1,83 ±0,05	1700—1800
хромистый	»	2000—2200	3,95 ±0,05	0,101	1,77 ±0,05	1,89 ±0,05	1700—1800
титанистый	»	2200—2300	3,95 ±0,05	0,112	1,70 ±0,05	1,80 ±0,05	1700—1800
циркониевый	»	2300—2400	4,10 ±0,05	—	1,90 ±0,05	1,92 ±0,05	1900—2000
монокорунд	»	2300—2400	3,97 ±0,03	0,150	1,99 ±0,05	1,91 ±0,05	1700—1800
сферокорунд	»	2000—2100	3,95 ±0,05	—	—	0,94 ±0,05	1700—1800
Техническое стекло	»	400—900	2,55 ±0,05	—	1,08 ±0,05	1,15 ±0,05	500—600
Корунд	Природный	1900—2200	4,00 ±0,10	0,135	1,75 ±0,05	1,82 ±0,05	1700—1800
Наждак	»	1900—2200	4,10 ±0,10	0,105	1,59 ±0,05	1,65 ±0,05	1700—1800
Гранат	»	1300—1650	3,85 ±0,35	0,103	1,82 ±0,05	1,79 ±0,05	1200—1250
Кремень	»	1000—1100	2,55 ±0,05	0,050	1,28 ±0,05	1,34 ±0,05	1500—1600

Таблица 1.4

Обозначения абразивных материалов

Абразивный материал	Марка		Абразивный материал	Марка	
	старая	новая		старая	новая
Нормальный электрокорунд	—	16А	Электрокорунд с графитным наполнителем	Э9Г	—
	Э5	15А	Монокорунд	М8	45А
	Э4	14А		—	44А
	Э3	14А		М7	43А
	Э2	13А	Зеленый карбид кремния	—	64С
	—	12А		КЗ9	63С
Белый электрокорунд	—	25А		КЗ8	63С
	Э9А	24А		КЗ7	63С
	Э9	23А		КЗ6	63С
	Э8	22А		КЗ5	—
Хромистый электрокорунд	ЭХА	34А	Черный карбид кремния	—	55С
	ЭХБ	33А		КЧ8	54С
	—	32А		КЧ7	53С
Титанистый электрокорунд	ЭТ	37А		КЧ5	—

§ 1.2. Алмазы и другие синтетические сверхтвердые материалы

Природные алмазы

Общие сведения. Алмаз представляет собой кристаллическую модификацию углерода. Кристаллическая решетка алмаза кубическая (рис. 1.1). Она содержит 18 атомов, из которых восемь расположены в вершинах куба, шесть в центрах его граней и четыре в центрах четырех из восьми кубов, образованных делением элементарной кубической ячейки тремя взаимно перпендикулярными плоскостями. Каждый атом в решетке связан общими электронами с четырьмя соседними атомами. Силы связи в четырех направлениях образуют между собою углы, равные 109° 28′. Постоянная кристаллической решетки алмаза равна 3,5675 Å ($3{,}5675 \cdot 10^{-4}$ мкм), кратчайшее расстояние между соседними атомами составляет 1,54 Å ($1{,}54 \cdot 10^{-4}$ мкм).

В природе алмазы встречаются в виде отдельных монокристаллов и их обломков или в виде сросшихся кристалликов — агрегатов. Наиболее часто кристаллы имеют форму куба, октаэдра или ромбододекаэдра, а также их комбинаций. Масса алмазов, встречающихся в природе, колеблется от сотых долей до нескольких сот карат (1 карат равен 0,2 г).

Из природных агрегатов наиболее широкое применение в промышленности находят баллас — шаровидные агрегаты, большей частью мелкозернистого строения и карбонадо — тонкозернистые, плотные и несколько пористые агрегаты. Кроме того, в некоторых случаях используют поликристаллические алмазы, содержащие дефекты.

Природные алмазы содержат небольшое количество (от 0,02 до 4,8%) примесей окислов алюминия, железа, кальция, кремния, марганца, титана и др. В зависимости от количества и состава примеси алмаз может быть бесцветным, а также окрашенным в желтый, голубой, розовый и другие цвета. Прозрачные алмазы имеют чрезвычайно высокие показатели светорассеяния и преломления, которыми обусловливается превосходная игра цветов в ограненных камнях.

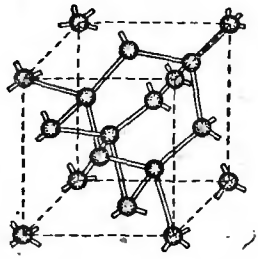


Рис. 1.1. Кристаллическая решетка алмаза

В зависимости от свойств и назначения природные алмазы делятся на ювелирные (около 20%) и технические (свыше 80%).

Физико-механические свойства. Атомы углерода в алмазе обладают чрезвычайно прочными ковалентными связями, которые обеспечивают его уникальные свойства, и прежде всего высокую твердость. Алмаз — самый твердый из всех известных в природе минералов. Модуль упругости алмаза также выше всех известных в природе твердых веществ; он в 1,5 раза выше, чем у твердых сплавов, и в 2,5 раза выше, чем у карбида кремния. Наряду с высокой твердостью и сравнительно большим сопротивлением сжатию алмаз обладает значительной хрупкостью из-за наличия плоскостей спайности в кристаллах, небольшого сопротивления изгибу и вибрационным нагрузкам.

Теплопроводность алмаза на порядок выше теплопроводности других абразивных и инструментальных материалов, а коэффициент линейного расширения в 5—10 раз меньше. Алмаз обладает чрезвычайно высокой износостойкостью. Так, износостойкость при трении по закаленной стали у алмаза в 100—200 раз выше, чем у обычных абразивов, и в 5000—10 000 раз выше, чем у твердых сплавов.

Как правило, природные алмазы хорошие изоляторы, и только некоторые из них являются полупроводниками. Основные физико-механические свойства алмаза приведены в табл. 1.5.

Физико-механические свойства алмаза зависят от температуры. На рис. 1.2 показана зависимость микротвердости алмаза и некоторых других абразивных материалов от температуры [31]. Чистая поверхность алмаза не смачивается водой, но прилипает к некоторым животным жирам. На алмазодобывающих предприятиях это свойство используют для извлечения алмазов из концентратов.

«Твердые» и «мягкие» направления в кристаллах. Твердость и прочность кристаллов алмаза в различных направлениях неодинакова; кристалл является анизотропным. Условно различают «твердые» и «мягкие» направления в кристаллах. По «мягким» направлениям алмаз обрабатывается легче, но сильнее изнашивается, чем по «твердым». При изготовлении инструментов алмаз необходимо обрабатывать в «мягком» направлении, а в процессе работы инструмента ориентировать кристалл так, чтобы износ происходил в «твердом» направлении. Направления в кристаллах определяют по внешней их форме или на специальных установках преимущественно с помощью рентгеновских лучей или звуковых колебаний. Имеются специальные приборы, в которых в соответствии с результатами анализа, осуществляемого электронным блоком, закрепленный во вращающейся державке кристалл поворачивается серводвигателем в наилучшее для обработки положение. Неодинаковы в «твердом» и «мягком» направлениях и некоторые другие свойства алмаза (рис. 1.3).

Химические свойства. Алмаз весьма устойчив к воздействию различных кислот. Он не растворяется в плавиковой, серной, азотной и соляной кислотах и даже в «царской водке» (смесь соляной и азотной кислот). При определенных условиях алмаз может растворяться в расплавах щелочей, натриевой и калиевой селитрах, а также в соде.

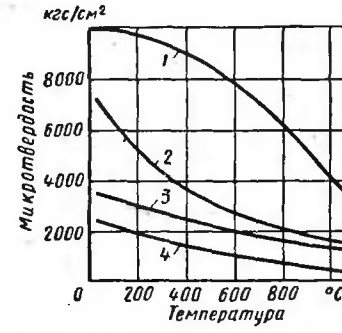


Рис. 1.2. Зависимость микротвердости от температуры:

1 — алмаз; *2* — эльбор; *3* — карбид кремния; *4* — электрокорунд

Таблица 1.5

Основные физико-механические свойства алмаза в сопоставлении со свойствами абразивных и инструментальных материалов

Материал	Плотность, г/см³	Твердость по Моосу	Микротвердость, кгс/мм²	Предел прочности		Модуль упругости, кгс/мм²	Коэффициент теплопроводности при 0°, кал/(см·с·град)	Удельная теплоемкость, кал/(г·град)	Температуропроводность, см²/с	Коэффициент линейного расширения, 1/град·10⁻⁶	Удельное электрическое сопротивление Ом·см·10⁻⁴
				на изгиб, кгс/мм²	на сжатие, кгс/мм²						
Алмаз	3,49—3,54	10	10 000	30	200	90 000	0,35	0,12	0,83	0,9—1,45	5
Кубический нитрид бора	3,44—3,49	9,9	9 250	—	—	72 000	0,1	0,16	0,18	2,1—4,0	—
Карбид кремния	3,2	9,0	3 300—3 600	5—15	150	36 500	0,037	0,14	0,084	6,5	—
Белый электрокорунд	3,95	8,5	2 000—2 100	8—9	76	—	0,047	0,18	0,11	7,5	—
Твердый сплав:											
Т15К6	11—11,7	—	2 800—3 000	110—115	390	52 000	0,065	0,059	0,1	6	0,4
ВК8	14,4—14,8	—	1 550—1 690	130—160	400—500	54 000	0,141	0,04	0,246	5	0,21
Минералокерамика ЦМ-332	3,93	—	2 000—2 300	30—45	90—150	400	0,01	0,2	0,013	—	—
Сталь Р18 (закаленная)	8,5—8,7	—	1 300—1 400	370	360	22 000	0,058	0,09	0,06	11	0,41

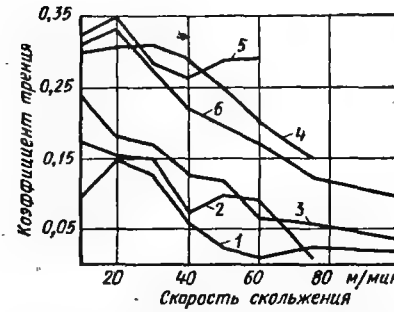


Рис. 1.3. Зависимость коэффициента трения алмаза по стали 50 в «твердом» (кривые *1, 2, 3*) и «мягком» (кривые *4, 5, 6*) направлениях от скорости скольжения для кристаллов различной формы:

1, 4 — кубическая; *2, 5* — октаэдрическая; *3, 6* — ромбододекаэдрическая

На воздухе алмаз сгорает при температуре 850—1200° С, в струе чистого кислорода — при 700—800° С. Интенсивность окисления зависит от величины относительной свободной поверхности, которая тем больше, чем меньше размер зерна и больше ее шероховатость. Чем больше относительная свободная поверхность, тем ниже температура горения. Мелкие зерна и зерна с дефектами сгорают быстрее. При этих же температурах, но менее интенсивно, алмаз окисляется парами воды и двуокисью углерода. Катализаторами при окислении могут быть щелочные (литий, натрий, калий) и некоторые другие (железо, хром, никель, медь, марганец) металлы. Присутствие соединений калия повышает интенсивность окисления алмаза водяным паром при 870° С в 45 раз [92].

При нагревании в вакууме или в инертной среде алмаз графитируется при температуре 800—1200° С. Повышение давления увеличивает стойкость алмазов против графитации.

Адгезионная способность. Алмаз способен к адгезии (схватыванию) с другими материалами. Сила адгезии зависит от температуры в контакте. Например, при увеличении температуры до 900° С сила адгезии алмаза с железом Армко увеличивается, а при дальнейшем увеличении температуры — уменьшается. Сила адгезии алмаза с титановым сплавом ВТ1-1 монотонно увеличивается с повышением температуры [31]. На рис. 1.4 приведены зависимости силы отрыва алмазного конуса, вдавленного в исследуемый материал, от температуры. Здесь же для сравнения даны силы адгезии для такого же конуса из эльбора и зеленого карбида кремния.

Диффузионная способность. При высокой температуре алмаз способен к активному диффузионному взаимодействию с некоторыми металлами, в особенности с железом и сталями. При температуре ниже 900° С диффузия углерода из алмаза в сталь малозаметна, так как растворимость его в α-железе не превышает 0,04%. При температуре выше точки фазового α—γ-превращения растворимость углерода резко возрастает. Так, при вдавливании алмазного конуса в образец из железа Армко при температуре 1000° С в течение 1 с образуется слой с содержанием углерода свыше 0,2% толщиной 40 мкм [31].

Люминесценция. Натуральные алмазы чаще всего светятся в рентгеновских, ультрафиолетовых и катодных лучах. Окраска свечения зависит от примесей, содержащихся в алмазе. Характер люминесценции тесно связан с износостойкостью алмазов; наибольшей износостойкостью и абразивной способностью обладают алмазы, не дающие люминесценции. Алмаз меняет окраску при облучении в циклотроне протонами и дей-

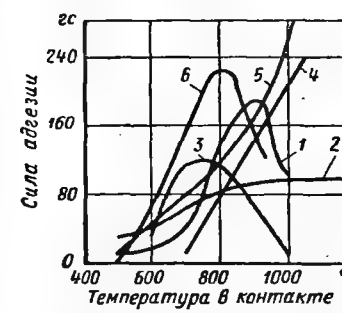


Рис. 1.4. Зависимость силы адгезии алмаза (*1, 4*), эльбора (*2, 5*), карбида кремния зеленого (*3, 6*) к железу Армко (*1, 2, 3*) и к титановому сплаву ВТ1-1 (*4, 5, 6*) от температуры

тронами. При облучении с приложением низких энергий алмаз зеленеет, при более интенсивном облучении он становится золотистым или коричневым.

Выбор формы и размеров кристаллов при изготовлении алмазных инструментов. В табл. 1.6 приведены номенклатура основных видов инструмента, который может быть изготовлен из кристаллов алмаза, и требования, предъявляемые к алмазному сырью [81].

Синтетические алмазы

Марки синтетических алмазов. В зависимости от размера зерен, метода их получения и контроля порошки из синтетических алмазов делят на две группы: шлифпорошки и микропорошки.

Шлифпорошки зернистостью от 50/40 до 630/500 получают путем рассева на ситах; зерновой состав их контролируют ситовым методом (подробнее о зернистости алмазных порошков см. § 1.3). Микропорошки зернистостью от 60/40 до 1/0 получают путем осаждения в жидкости с контролем зернового состава микроскопическим методом. Согласно ГОСТ 9206—70 «Порошки алмазные» выпускают шлифпорошки из синтетических алмазов пяти марок: АСО, АСР, АСВ, АСК и АСС.

АСО — зерна с шероховатой, наиболее развитой поверхностью и повышенной хрупкостью; обладают хорошими режущими свойствами, работают с минимальным потреблением энергии и выделением тепла. Алмазы этой марки рекомендуются для использования в инструментах на органической связке с применением смазывающе-охлаждающих жидкостей и без них.

АСР — зерна с меньшей хрупкостью, чем зерна АСО; имеют развитую поверхность и хорошо удерживаются в связке. Алмазы этой марки рекомендуются для изготовления инструмента на органических, керамических и металлических связках.

АСВ — зерна с меньшей хрупкостью и большей прочностью, чем АСО и АСР; имеют по сравнению с последними более гладкую поверхность. Алмазы этой марки рекомендуются для изготовления инструмента на металлических связках, работающего при больших давлениях.

АСК — зерна с меньшей хрупкостью и большей прочностью по сравнению с зернами АСО, АСР, АСВ. Алмазы этой марки рекомендуются для изготовления инструмента на твердых металлических связках, применяемого в особо тяжелых условиях работы — для резки и обработки природного камня (гранита, мрамора, известняка), а также других твердых материалов.

АСС — зерна блочной формы, имеющие максимальную прочность по сравнению с алмазами других марок. Прочность зерен АСС выше прочности природных алмазов. Алмазы этой марки рекомендуются для изготовления бурового инструмента, правки абразивных кругов, резки и обработки корунда, рубина и других особо твердых материалов.

В последнее время освоен выпуск алмазов марок САМ и АСТ. Это хорошо ограненные кристаллы размером 0,6 — 1,6 мм без трещин и включений. По прочности САМ и АСТ мало уступают природным алмазам.

ГОСТ 9206—70 предусматривает прочность (величину разрушающей нагрузки) для зерен различных зернистостей и различных типов алмаза (табл. 1.7). Для установления прочности алмазных шлифпорошков применяют устройства, обеспечивающие возможность определения разрушающей нагрузки одиночных зерен при одноосном сжатии их между корундовыми пластинками плавно возрастающей нагрузкой. Прочность шлифпорошка определяют по результатам последовательного разрушения 50 зерен. Прочность синтетических алмазов, так же как и природных, во многом зависит от примесей. Однако не всегда примеси снижают прочность алмазов. Легирование бором и азотом при синтезе в определенных условиях может повысить прочность и микротвердость зерен на 10—15%, так как присутствие этих элементов при рекристаллизации способствует образованию кристаллов более совершенной формы.

Алмазные зерна различных марок различаются и по геометрическим параметрам. В табл. 1.8 приведены средние значения некоторых геометрических

Таблица 1.6

Технические алмазы, используемые для инструмента

Назначение	Форма алмазов	Допустимые дефекты	Масса, карат
Для резцов	Ромбододекаэдры и ромбододекаэдроиды, кристаллы пиленые, колотые и шлифованные	Алмазы с единичными значительными или несколькими незначительными дефектами вне рабочей части кристалла	0,1—5,0
Для сверл	Октаэдры, октаэдроиды, ромбододекаэдры, ромбододекаэдроиды, резко удлиненные и уплощенные, кристаллы пиленые, колотые и шлифованные (отношение длины кристалла к толщине не менее 4 : 1)	Незначительные дефекты вне рабочей части кристалла, а также незначительные дефекты в рабочей части, которые могут быть сняты при обработке	0,05—0,40
Для профильной и автоматической правки шлифовальных абразивных кругов	Октаэдры, октаэдроиды, ромбододекаэдры, ромбододекаэдроиды правильной формы, с незначительным искажением и незначительной ступенчатостью, имеющие не менее трех вершин	Небольшие включения, незначительные трещины, раковины, сколы, расположенные вне периферийной зоны трех рабочих вершин	0,05—2,0
Для правки резьбошлифовальных и других кругов	Октаэдры и ромбододекаэдры с естественными резко выраженными острыми вершинами (не менее трех)	Небольшие включения, незначительные трещины, раковины, сколы, расположенные вне периферийной зоны трех рабочих вершин	0,05—0,30
Для алмазно-металлических карандашей	Целые кристаллы различной формы, за исключением кубов, закономерных сростков и грубоступенчатых кристаллов	Незначительные дефекты	0,05—0,5

Примечание. Под термином «незначительные» понимают дефекты (включения, трещины, раковины, сколы), которые едва видны в лупу шестикратного увеличения. Значительные дефекты отчетливо видны невооруженным глазом.

Таблица 1.7

Прочность на сжатие (кгс) шлифпорошков различных марок

Зернистость	АСО	АСР	АСВ	АСК	АСС
		Широкий диапазон зернистости			
400/250	—	—	1,18	—	—
250/160	—	0,64	0,83	—	—
160/100	0,2	0,44	0,6	—	—
100/63	0,17	0,32	0,45	—	—
63/40	0,15	—	—	—	—
		Узкий диапазон зернистости			
630/500	—	—	—	—	6,6
500/400	—	—	—	2,7	5,4
400/315	—	—	1,3	2,3	4,6
315/250	—	—	1,06	1,9	3,8
250/200	—	0,70	0,9	1,6	3,2
200/160	—	0,58	0,77	1,4	2,9
160/125	0,22	0,48	0,66	1,2	2,4
125/100	0,2	0,4	0,56	1,0	2,0
100/80	0,18	0,35	0,48	0,9	—
80/63	0,17	0,29	0,43	—	—
63/50	0,16	0,26	—	—	—
50/40	0,15	0,26	—	—	—

параметров зерен различных марок размером 125/100 по результатам измерения 300 зерен каждой марки [69].

Чем прочнее алмазы, тем менее развитую поверхность зерен они имеют (табл. 1.9) [67].

Микропорошки из синтетических алмазов выпускают двух марок: АСМ и АСН.

АСМ — микропорошки с нормальной абразивной способностью; рекомендуются для изготовления инструмента, паст и суспензий, применяемых при обработке твердых сплавов, закаленных сталей и других твердых материалов.

Таблица 1.8

Средние значения геометрических параметров зерен алмазов различных марок

Марка алмаза	Радиус скругления кромок, мкм	Угол заострения кромок, град	Количество		Коэффициент изометричности *
			округлений на контуре зерна	впадин на контуре зерна	
АСО	15,4	94	4,2	3,9	1,35
АСР	18,7	96	3,7	3,4	1,34
АСВ	19,5	100,7	3,5	2	1,33

* Коэффициент изометричности — отношение длины к ширине прямоугольника, описанного вокруг проекции зерна.

Таблица 1.9

Удельная поверхность алмазных зерен различных марок зернистостью 100/80

Алмазные зерна	Удельная поверхность	
	абсолютная, см²/карат	относительная, %
Синтетические:		
АСО	194	100
АСР	140	72
АСВ	95	49
АСС	63	32
Природные	82	42

АСН — *микропорошки с повышенной абразивной способностью; рекомендуются для изготовления инструмента, паст и суспензий, применяемых при обработке природных и синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов, корунда, специальной керамики.*

Физико-механические и химические свойства синтетических алмазов, те же, что и природных, только колеблются в более широких пределах. По сравнению с природными алмазами синтетические алмазы могут иметь более шероховатую поверхность с выступами, углублениями и большим числом режущих микрокромок на одном зерне. Зерна синтетических алмазов имеют меньшие углы заострения и меньшие радиусы скругления вершин, что обеспечивает их более высокую режущую способность по сравнению с природными алмазами. Изменяя режим синтеза, можно создавать алмазы с заранее заданными свойствами по форме зерен и характеру их поверхности, а также по прочности и хрупкости.

Синтетические алмазы, как и природные, сгорают на воздухе при температуре 800—1000° С. Графитация синтетических алмазов может происходить при более низких температурах, чем природных. Так, алмазные зерна размером 250 мкм графитируются полностью уже при 1000—1100° С. В поликристаллах графитация протекает в первую очередь по границам кристаллов, что приводит к нарушению связей между ними и снижению механической прочности.

Синтетическим алмазам можно придать свойства полупроводников. Для этого алмазы бомбардируют ионами, образующимися в результате электрического разряда в газе. Анод и катод разрядного устройства могут быть изготовлены из никеля или молибдена, причем катод, на который помещают исследуемый алмаз, может подвергаться вибрации, и бомбардировка осуществляется по всей контактной поверхности алмаза. Полупроводниковые алмазы используют в качестве рабочих тел высокотемпературных транзисторов, детекторов радиации и других активных элементов в приборах.

Металлизированные алмазы. Металлизация алмазов осуществляется главным образом электролитическим способом. В качестве покрытий используют металлы с хорошими адгезионными и капиллярными свойствами по отношению к алмазу — медь, никель, серебро, титан и их сплавы. Металл заполняет мельчайшие трещины, поры и раковины на поверхности зерна, являющиеся концентраторами напряжений. После затвердевания он оказывает своеобразное цементирующее воздействие на поверхность зерна, одновременно блокируя дислокационные нарушения на ней. Таким образом, влияние дефектов поверхности на прочность алмазных зерен в значительной мере устраняется. Разрушающая нагрузка после металлизации алмазов увеличивается в 1,5—2,5 раза, причем упрочняющее действие металлизации возрастает с увеличением размеров зерен, поскольку крупные зерна имеют больше дефектов, снижают их прочность. Металлизация алмазов, кроме повышения прочности зерен, может привести к повышению адгезии зерен со связкой при изготовлении алмазного инструмента, улучшению теплоотвода от зерна в связку. Металлизация обеспечивает возможность ориентации зерен в магнитном поле при изготовлении инструмента с ориентированными зернами.

Кроме электролитического, известен еще ряд способов металлизации алмазов: вакуумное напыление металлических частиц на поверхность алмазов, нанесение металлической пленки на поверхность алмаза при помощи тлеющего разряда, нанесение пленок химическим и электрохимическим методами, диссоциация соединения металла при высокой температуре в присутствии легкоплавкого припоя; газотранспортные реакции в инертном газе или в кипящем слое. Кроме металлов, зерна алмазов можно покрывать другими веществами, например карбидом кремния и пластмассами.

Для увеличения размеров металлизированных алмазов получают агрегаты, состоящие из 3—10 алмазных зерен, спаянных металлом. Агрегатированные металлизированные алмазы обладают большей износостойкостью, чем однокристальные металлизированные алмазы.

Поликристаллические синтетические баллас и карбонадо впервые получены в СССР в Институте физики высоких давлений АН СССР. Синтетические бал-

лас (АСБ) и карбонадо (АСПК) являются прочно сцементированной массой достаточно совершенных мелких кристаллов. Если в крупных монокристаллах синтетического алмаза имеется большое количество дефектов (микротрещины, дислокации, включения, искажения формы и т. п.), которые снижают прочность зерен, то в мелких кристаллах вероятность появления дефектов при синтезе уменьшается. Мелкие кристаллы синтетического алмаза по своей форме в известной степени близки к идеальным, поэтому и механические свойства синтетических балласов и карбонадо очень высоки. Например, прочность зерен из дробленых балласов соответствует прочности зерен алмазов типов АСР и АСВ. Испытания показали, что работоспособность АСБ и АСПК находится на уровне работоспособности природных алмазов, а во многих случаях и превосходит ее. В частности, монокристалл природного алмаза царапается резцом из синтетического карбонадо.

В СССР освоен выпуск зерен синтетических балласа и карбонадо диаметром до 8 мм, которые можно использовать для однокристального инструмента.

Поликристаллические алмазы СВ, синтезированные во ВНИИ твердых сплавов, имеют поликристаллическую структуру с беспорядочной ориентацией кристаллов. Поры, раковины, трещины не обнаружены при увеличении в 10 000 раз. Кроме алмаза, в материале присутствует вторая фаза, выделяющаяся в виде тончайших прожилок между кристаллами алмаза либо в виде скоплений неправильной формы, заполняющих пространства между зернами. Эта фаза кристаллизуется в виде мелкодисперсной сорбитообразной стружки с включениями мелких алмазных зерен.

Общее количество примесей, по данным химического анализа, не превышает, как правило, 2%. В пределах чувствительности рентгеноспектрального метода (0,01—0,05% массовых частей) примесей в алмазных зернах не обнаружено. Найденные элементы распределены во второй фазе.

Плотность алмазов СВ колеблется в пределах 3,34—3,45 г/см^3, что составляет 95—98% от теоретической плотности алмаза; предел прочности на сжатие более 500 кгс/мм^2, что в 2 раза превышает прочность природного алмаза.

Новые синтетические сверхтвердые материалы

Кубический нитрид бора (КНБ) как вещество в природе неизвестен. Он синтезирован из нитрида бора — вещества, во многом похожего на графит. Как и графит, нитрид бора кристаллизуется в гексагональную решетку, близкую по своим параметрам к гексагональной решетке графита. Атомные веса бора и азота близки к атомному весу углерода; в таблице Менделеева бор и азот находятся рядом с углеродом, слева и справа от него. Весьма близко сходны и физико-механические свойства графита и нитрида бора.

Обработка нитрида бора в специальной камере при давлениях и температурах того же порядка, что и при синтезе алмаза, позволила получить вещество, кристаллическая решетка и физико-механические свойства которого близки к свойствам алмаза. Постоянная кристаллической решетки и минимальное расстояние между атомами у КНБ (3,6165 и 1,56 Å) несколько больше, чем у алмаза (3,5675 и 1,54 Å), поэтому твердость КНБ несколько ниже. Однако она превышает твердость всех других известных веществ, кроме алмаза.

Преимуществом КНБ перед алмазом как инструментальным материалом является его высокая теплостойкость и диффузионная устойчивость. На КНБ не действуют соляная, серная, азотная, фосфорная, плавиковая кислоты, «царская водка» и растворы щелочей. Стойкость окислению при нагревании до температуры 1400° С почти вдвое превышает указанный показатель для алмаза. КНБ разлагается при сплавлении со щелочами при температуре 400—600° С. С уменьшением зернистости степень разложения увеличивается. Например, при нагревании до 400° С едким натром зерен КНБ размером 5—3 мкм в течение 30 мин разлагается 55% КНБ, а зерен размером 250—200 мкм — 6%. При 700° С наблюдается полное разложение зерен размером 5—3 мкм, а зерен 250—200 мкм — на 88%. КНБ не вполне устойчив к перегретому водяному

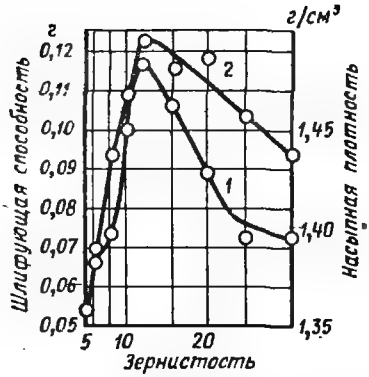


Рис. 1.5. Шлифующая способность (*1*) и насыпная плотность (*2*) эльборовых зерен различной зернистости

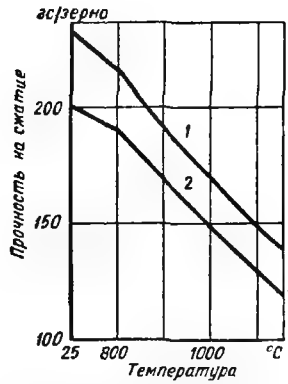


Рис. 1.6. Зависимость прочности алмаза (*1*) и эльбора (*2*) от температуры

пару: зерна 100—80 мкм разлагаются при обработке паром при температуре 900° С в течение 2 ч на 4,7%, в течение 6 ч — на 10% [109].

В СССР кубический нитрид бора выпускают двух модификаций — эльбор (завод «Ильич», г. Ленинград) и кубонит (Институт сверхтвердых материалов АН УССР, г. Киев). Промышленные способы производства позволяют получать эльбор различного строения, физико-механических свойств и эксплуатационных показателей в зависимости от назначения материала (эльбор-Л для получения порошков, идущих на изготовление абразивного инструмента, и эльбор-Р, используемый для изготовления пластинок для резцов, фрез и другого лезвийного инструмента, режущих элементов буровых коронок, инструмента для сверления отверстий в бетоне и железобетоне).

Подобно зернам синтетических алмазов, зерна эльбора-Л выпускают марок ЛО и ЛП. Зерна ЛО имеют более развитую поверхность и меньшую прочность, чем зерна ЛП. Эльбор выпускают трех групп зернистости: шлифзерно (Л25—Л16), шлифпорошки (Л12—Л4) и микропорошки (ЛМ40—ЛМ1).

Эльбор до зернистости 12 синтезируют в виде монокристаллов, а крупнее 12 в виде поликристаллов. Шлифующая способность, определяемая по методике ВНИИАШ [56], и насыпная плотность с ростом зернистости до 12 повышаются, а с дальнейшим увеличением размеров зерна снижаются (рис. 1.5). Прочность зерен эльбора, так же как и синтетического алмаза, снижается с увеличением температуры (рис. 1.6). Авторы в работе [34] объясняют снижение прочности появлением гексагональной фазы нитрида бора. Средние значения разрушающей нагрузки зерен эльбора марки ЛО зернистостью 6, 8, 10, 12, 16, 20, 25 составляют соответственно *200, 210, 230, 230, 250, 250, 280 г/зерно. Зерна эльбора*, как и зерна синтетических алмазов, имеют более развитую поверхность, чем зерна натуральных алмазов и в особенности абразивов.

Из кубонита изготовляют шлифпорошки двух марок: обычной прочности КО с размером зерен от 160/125 до 50/40 и повышенной прочности КР с размером зерен от 250/200 до 50/40 и микропорошки КМ с размером зерен от 60/40 до 1/0. Зерна КО имеют более развитую поверхность и меньшую механическую прочность, чем КР. Кроме того, в ИСМ выпускают порошки с металлическим покрытием (КОМ и КРМ — обычной и повышенной прочности), с неметаллическим покрытием (КОС) и агрегатированные с металлическим покрытием (КОМА) [15].

Для упрочнения зерна КНБ, подобно зернам синтетических алмазов, металлизируют сплавами серебро—медь—титан или медь—олово—титан, либо покрывают неметаллической оболочкой (бор—силикат, специальные пластмассы,

керамика) толщиной 3—4 мкм. Металлизация повышает прочность кубического нитрида бора в среднем на 20—30%. Так, по данным [74], зерна ЛО10 имели до металлизации среднюю прочность 210 г/зерно, а после металлизации 290 г/зерно.

Славутич — сверхтвердый синтетический материал, синтезированный в Институте сверхтвердых материалов АН УССР. Славутич, не уступая алмазам по износостойкости, превосходит их по прочности и может быть изготовлен в виде штабиков и пластин любой формы и размеров. Работоспособность при использовании в буровых правящих инструментах в 1,4—1,5 раза выше работоспособности синтетических алмазов [10].

Поликристаллический кубический нитрид бора (ПКНБ) синтезирован в Институте физики высоких давлений АН СССР. Зерна ПКНБ представляют собой агрегаты сросшихся сложным образом кристаллов КНБ, разделенных незначительным количеством продуктов кристаллизации маточного раствора. В зависимости от условий синтеза ПКНБ получают двух типов: с мелкозернистой структурой и с направленной дендритной кристаллизацией.

Гексанит-Р — поликристаллический материал на основе бора и азота, синтезированный в Институте проблем материаловедения АН УССР совместно с Полтавским заводом искусственных алмазов и алмазного инструмента. Основная часть (75—80%) кристаллов гексанита-Р имеет гексагональную кристаллическую решетку, но правильная тетраэдрическая конфигурация ее нарушена— длина связи в направлении одной из осей несколько больше остальных. Материал синтезирован в результате горячего спекания при сверхвысоких давлениях; заготовки имеют вид цилиндриков диаметром 3—8 мм и высотой 2—5 мм. Гексанит-Р имеет тонкозернистую скрытокристаллическую структуру, размер частей основной фазы менее 1 мкм, обладает высокой микротвердостью (4000—6000 кгс/мм^2) и пониженной хрупкостью, что позволяет использовать его при работе с ударными нагрузками. Полтавский завод искусственных алмазов и алмазного инструмента выпускает режущий инструмент, оснащенный пластинками гексанита-Р [10, 24].

Исмит — поликристаллический сверхтвердый материал, синтезированный в Институте сверхтвердых материалов АН УССР на основе кубического нитрида бора [14]. Исмит получают при высоких давлениях и температурах, соответствующих области термодинамической стабильности кубической модификации нитрида бора. ИСМ освоено производство трех марок этого материала — исмит-1, исмит-2 и исмит-3, отличающихся технологией производства, параметрами синтеза и исходным сырьем. Исмит-3 разработан совместно с Институтом химической физики АН СССР. Из исмита могут быть изготовлены вставки любой формы, необходимые для оснащения резцов и фрез.

В СССР выпускают свыше 2000 типоразмеров инструмента из синтетических алмазов и кубического нитрида бора. В табл. 1.10 приведены основные типы инструмента из алмазов и других синтетических сверхтвердых материалов и ориентировочные области их рационального применения.

Таблица 1.10

Основные виды инструмента из синтетических сверхтвердых материалов и области их применения

Материал	Инструмент	Область применения
АСО	Шлифовальные круги на органических связках	Чистовое шлифование деталей из твердых сплавов; доводка режущего и мерительного инструмента и штампов
	Шлифовальные ленты	Шлифование деталей из твердых сплавов, жаропрочных и титановых сплавов, закаленных сталей, пластмасс, грунтовки
	Бруски	Чистовое и отделочное хонингование

Материал	Инструмент	Область применения
АСР	Шлифовальные и отрезные круги на металлических и керамических, реже на органических связках	Получистовое и чистовое шлифование деталей из твердых сплавов, заточка и доводка режущего и мерительного инструмента и штампов, в том числе совместное шлифование стали и твердого сплава; шлифование стружколомающих канавок; обработка керамики, кремния, кожи, резины, стекла; фактурная обработка строительных материалов
	Бруски	Хонингование деталей из легированной стали и чугуна; зубохонингование Суперфиниширование, в том числе силовое
	Сверла	Сверление стекла, пластмасс, строительных материалов
АСВ	Шлифовальные и отрезные круги на металлических, реже на керамических связках	Шлифование деталей из стекла, керамики, магнитных сплавов, вольфрама, огнеупоров, строительных материалов, асбоцемента, стеклопластика, кварца, пластмасс, металлов; электролитическое шлифование и заточка инструмента
	Сверла	Сверление стекла, пластмасс, строительных материалов
	Бруски	Хонингование деталей из легированной стали и чугуна
АСК	Отрезные круги, сегментные пилы	Резка природного камня (гранита, мрамора, известняка), бетона, полупроводников, керамики, железобетона, огнеупоров, асбокаучука
	Бруски	Хонингование закаленных чугунов
	Шлифовальные круги	Шлифование мрамора; грубое фактурное шлифование строительных материалов
	Сверла	Сверление отверстий в минералокерамике, рубине, сапфире, ситаллах, стекле, стеклопластике, стеклокварце, бетоне, железобетоне, огнеупорах
АСС	Буровой инструмент	Бурение горных пород
	Правящий инструмент	Правка абразивных кругов
	Отрезные круги, сегментные пилы	Резка корунда, рубина, граната и других особотруднообрабатываемых материалов

Материал	Инструмент	Область применения
АСТ	Однокристальный инструмент (резцы, стеклорезы, граверные иглы, сверла, фрезы)	Обработка алмаза, рубина, корунда, минералов, стекла, полупроводников
САМ	Наконечники измерительных приборов	Измерение твердости
	Сверла	Сверление отверстий в стекле, феррите, металле, кварце, керамике, минералокерамике
	Отрезные круги	Резка минералов, драгоценных камней, полупроводников, кремния, кварца, германия, корунда, лейкосапфира
	Буровые коронки	Бурение твердых пород
	Правящие карандаши	Правка абразивных кругов
АСБ	Кристальный лезвийный режущий инструмент (резцы, фрезы)	Обработка алюминиевых сплавов, стеклопластика, латуни, пластмасс, керамики, силуминов, кремния, пластифицированного твердого сплава
	Буровой инструмент	Бурение гранитов и других твердых пород
	Выглаживатели	Выглаживание поверхности деталей из стали и цветных металлов
	Отрезные круги из дробленых балласов	Резка минералов
	Шлифовальные круги (крупнозернистые) из дробленых балласов	Шлифование камня, строительных материалов, твердых сплавов
	Бруски (из дробленых балласов)	Черновое хонингование сталей. Суперфиниширование изделий из стали и чугуна
АСПК	Однокристальный инструмент, в основном резцы	Обработка алюминиевых сплавов, стеклопластика, полупроводников, пластифицированного твердого сплава
	Измерительные наконечники	Измерение твердости сталей, твердых сплавов
	Буровые коронки	Бурение горных пород
	Шлифовальные круги (из дробленых карбонадо)	Обработка твердых сплавов

Материал	Инструмент	Область применения
Эльбор-Л	Шлифовальные круги	Получистовое и чистовое шлифование деталей из сталей, чугуна, нержавеющих и сверхпрочных сталей и сплавов, цветных металлов, магнитных сплавов, заточка и доводка режущего инструмента, в том числе фасонного; вышлифовка канавок сверл и метчиков; обработка подшипников; шлифование направляющих металлорежущих станков
	Резьбо- и зубошлифовальные круги	Чистовое шлифование зубчатых колес, резьбо- и зубообрабатывающего инструмента, ходовых винтов
	Бруски	Хонингование деталей из углеродистых, легированных быстрорежущих сталей, чугуна, цветных металлов, суперфиниширование деталей из стали, чугуна, цветных металлов
	Лента	Полирование и доводка деталей из стали, чугуна, цветных металлов
	Пасты	Полирование, доводка, лекально-слесарные работы
Эльбор-Р	Лезвийный режущий инструмент	Обработка закаленных легированных сталей и чугунов (наружное точение, растачивание, подрезка торцов, нарезание резьбы)
	Кольцевые сверла	Сверление бетона и железобетона, гранита и других горных пород
	Долота, буровые коронки	Бурение твердых пород
Кубонит	Шлифовальные круги	Получистовое и чистовое шлифование деталей из сталей, чугуна, магнитных сплавов (пермаллой, альфенол), бронзы; заточка и доводка быстрорежущего инструмента, в том числе фасонного; заточка хирургического инструмента; шлифование колец подшипников; шлифование направляющих металлорежущих станков
	Резьбо- и зубошлифовальные круги	Чистовое шлифование зубчатых колес; шлифование твердосплавных метчиков и резьбовых фрез, ходовых винтов; наружное и внутреннее резьбошлифование
	Лезвийный режущий инструмент	Обработка деталей из чугуна и стали, цветных металлов
	Кольцевые сверла	Сверление железобетона

Материал	Инструмент	Область применения
Славутич	Буровые коронки, долота	Бурение горных пород
	Правящий инструмент (карандаши, бруски, ролики, блоки)	Правка шлифовальных кругов
Исмит	Лезвийный режущий инструмент	Точение, растачивание чугуна и закаленных сталей
Гексанит-Р	Лезвийный режущий инструмент (резцы, фрезы)	Обработка деталей из сырых и закаленных конструкционных, легированных и жаропрочных сталей, твердых сплавов группы ВК. Эффективен при обработке с ударами (например, прерывистых поверхностей)

§ 1.3. Форма и размеры зерен абразивных и алмазных порошков

Зернистость абразивных материалов

Полученные в электрических печах или добытые в рудниках абразивные материалы сортируют, а затем дробят и измельчают в специальных машинах. В зависимости от состава исходного материала, требований к составу и свойствам зерновых продуктов абразивные материалы подвергают различным видам обогащения (в том числе магнитному и химическому), термической обработке и затем классифицируют по крупности частиц.

Классификацию шлифовальных зерен и порошков по крупности осуществляют рассевом ситами на специальной аппаратуре, позволяющей получить продукты требуемого зернового состава. Для разделения по крупности частиц мельче 40 мкм, а иногда и более крупных применяют гидравлическую классификацию, в результате которой получаются микропорошки, отвечающие определенным техническим требованиям. Зернистость абразивных материалов обозначают номерами в соответствии с ГОСТ 3647—71, который соответствует рекомендациям СЭВ по стандартизации РС 2203—69.

В зависимости от крупности частиц абразивные материалы делят на группы и номера (табл. 1.11, 1.12). Каждый номер зернистости по ГОСТ 3647—71 характеризуется следующими фракциями: предельной, крупной, основной, комплексной и мелкой (первой и второй). Комплексная фракция для шлифзерен и шлифпорошков состоит из трех фракций: крупной, основной и смежной; для микропорошков — из двух фракций: основной и смежной.

Определяющей характеристикой зернистости является ее основная фракция. Крупность основной фракции продуктов рассева определяют размерами двух смежных сеток (см. табл. 1.12), через первую из которых все зерна основной фракции проходят и задерживаются на второй. За зернистость принимают номинальный размер стороны ячейки в свету сетки, на которой задерживается зерно. Например, для основной фракции 500—400 мкм зернистость будет 40. Крупность основной фракции продуктов гидравлической классификации определяют линейными размерами зерен. За номер зернистости микропорошков принимают верхний предел зерен основной фракции (табл. 1.13). Приведенные выше обозначения зернистости являются в СССР едиными для всех абразивных материалов, кроме синтетических алмазов (см. ниже).

Таблица 1.11

Группы и зернистости материалов

Группа зернистости	Зернистость	Способ классификации
Шлифзерно	200, 160, 125, 100, 80, 63, 50, 40, 32, 25, 20, 16	Рассев
Шлифпорошки	12, 10, 8, 6, 5, 4, 3	»
Микропорошки	М63, М50, М40, М28, М20, М14	Гидроклассификация
Тонкие микропорошки	М10, М7, М5, М3, М2, М1	»

Таблица 1.12

Обозначение зернистости абразивных материалов (шлифзерна и шлифпорошков) в метрической системе

Номер зернистости (в десятках мкм)	Номер сетки, через которую проходит основная фракция зерна	Номинальный размер стороны ячейки в свету, мкм	Номер сетки, на которой задерживается основная фракция зерна	Номинальный размер стороны ячейки в свету, мкм
200	2,5	2500	2	2000
160	2	2000	1,6	1600
125	1,6	1600	1,25	1250
100	1,25	1250	1	1000
80	1	1000	08	800
63	08	800	063	630
50	063	630	05	500
40	05	500	04	400
32	04	400	0315	315
25	0315	315	025	250
20	025	250	02	200
16	02	200	016	160
12	016	160	0125	125
10	0125	125	01	100
8	01	100	008	80
6	008	80	0063	63
5	0063	63	005	50
4	005	50	004	40
3	004	40	—	28 *

* Определяют под микроскопом.

Таблица 1.13

Размеры зерен основной фракции микропорошков

Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм
М63	63—50	М28	28—20	М10	10—7
М50	50—40	М20	20—14	М7	7—5
М40	40—28	М14	14—10	М5	5—3

Таблица 1.14

Содержание основной фракции (в %)

Индекс зернистости	Зернистость							
	200—32	25—16	12—8	6—4	3	М63—М28	М20—М14	М10—М5
В	—	—	—	—	—	60	60	55
П	55	55	55	55	—	50	50	45
Н	45	43	45	40	40	45	40	40
Д	41	39	41	36	36	42	37	37

В зависимости от процентного содержания основной фракции при соблюдении норм по остальным фракциям зернистость дополняют буквенным индексом согласно табл. 1.14.

В отличие от стандартов, принятых в СССР и странах СЭВ, в европейских странах, входящих в FEPA (Европейская Организация изготовителей абразивов), приняты отдельные стандарты на шлифзерна для изготовления абразивного инструмента на керамической и органической связках, на шлифзерна для изготовления шкурки, на микропорошки для абразивного инструмента на различных связках и микропорошки для шлифовальной шкурки.

В табл. 1.15 приведены обозначения зернистостей абразивных материалов по ГОСТ 3647—71 на зерна и порошки для шлифовальных кругов и шлиф-

Таблица 1.15

Обозначения зернистостей, размер зерен и содержание основной фракции абразивных материалов

По ГОСТ 3647—71			По стандарту FEPA 32GB 1971			По стандарту FEPA 31GB 1971		
Зерна и порошки для шлифовальных кругов и шлифшкурки			Зерна и порошки для шлифовальных кругов			Зерна и порошки для шлифовальной шкурки		
				Основная фракция			Основная фракция	
Зернистость	Размер, мкм	Содержание основной фракции, %	Зернистость	Размер, мкм	Содержание, %	Зернистость	Размер, мкм	Среднее содержание, %
—	—	—	8	2800—2360	45	—	—	—
200	2500—2000	45	10	2360—2000	45	—	—	—
160	2000—1600	45	12	2000—1700	45	12	2000—1700	45
—	—	—	14	1700—1400	45	—	—	—
125	1600—1250	45	16	1400—1180	45	16	1400—1180	49
100	1250—1000	45	20	1180—1000	45	20	1000—850	44
80	1000—800	45	24	850—710	45	24	850—710	47
63	800—630	45	30	710—600	45	30	710—600	47
50	630—500	45	35	600—500	45	36	600—500	47
40	500—400	45	46	425—355	40	40	425—355	47
32	400—315	45	54	355—300	40	50	355—300	49
25	315—250	43	60	300—250	40	60	300—250	45
20	250—200	43	70	250—212	40	—	—	—
16	200—160	43	80	212—180	40	80	212—180	49
—	—	—	90	180—150	40	100	180—150	45
12	160—125	45	100	150—125	40	—	—	—
10	125—100	45	120	125—106	40	120	125—106	44
8	100—80	45	150	106—65	40	150	106—90	49
—	—	—	—	—	—	180	90—75	47
6	80—63	40	180	90—63	40	220	75—63	47
5	63—50	40	220	75—53	40	—	—	—
4	50—40	40	—	—	—	—	—	—
3	40—28	40	—	—	—	—	—	—

Обозначения зернистости и размер зерен микропорошков

По ГОСТ 3647—71		Стандарт FEPA 33GB 1971			Стандарт FEPA 31GB 1971		
Микропорошки для шлифовальных кругов, шлифовальной шкурки и использования в свободном виде		Микропорошки для шлифовальных кругов			Микропорошки для шлифовальной шкурки		
Зернистость	Размер зерен основной фракции, мкм	Зернистость	Среднемедианный размер зерен, мкм	Размер максимальных зерен, мкм (не более 0,1%)	Зернистость	Среднемедианный размер зерен, мкм	Размер максимальных зерен, мкм (не более 0,1%)
М63	63—50	—	—	—	240	58±2,0	106
		230/53	53±3,0	106	280	52,2±2,0	90
М50	50—40	240/45	44,5±2,0	90	320	46,2±1,5	90
			—	—	360	40,5±1,5	75
М40	40—28	280/37	36,5±1,5	75	400	35,0±1,5	75
		300/29	29,2±1,5	63	500	30,2±1,5	63
М28	28—20	—	—	—	600	25,75±1,0	63
		360/23	22,8±1,5	53	800	21,8±1,0	53
М20	20—14	400/17	17,3±1,0	45	1000	18,3±1,0	45
		—	—	—	1200	15,3±1,0	38
М14	14—10	500/13	12,8±1,0	38	—	—	—
М10	10—7	400/9	9,3±1,0	32	—	—	—
М7	7—5	800/7	6,5±1,0	22	—	—	—
М5	5—3	1000/5	4,5±0,8	16	—	—	—
—	—	1200/3	3,0±0,5	11	—	—	—

шкурки, по стандарту FEPA 32GB 1971 на зерна и порошки для шлифовальных кругов и по стандарту FEPA 31GB 1971 на зерна и порошки для шлифовальной шкурки. Из ГОСТ 3647—71 для сравнения взяты зернистости с нормальным содержанием основной фракции. Из стандартов FEPA для сопоставимости взято среднее содержание основных фракций всех зернистостей, полученное расчетным путем. Стандарты США, Японии и ряда других стран весьма близки к стандартам FEPA. Различие в размерах зерен по ГОСТ 3647—71 и стандартам FEPA объясняется разными шкалами классификации, принятыми в СССР и в странах, входящих в FEPA. В СССР принята метрическая шкала классификации с модулем 1,25, увязанная с ГОСТ 3584—73 на сита, а в стандартах FEPA и в США действует дюймовая шкала классификации с модулем 1,189, увязанная со стандартом США ASTM-11—70 на сита. Шкала ASTM является более узкой и предусматривает 20 зернистостей (от № 8 до № 220) абразивных материалов для производства абразивных инструментов на жесткой основе и 15 зернистостей (от № 12 до № 220) для шлифовальной шкурки. Принятый в СССР ГОСТ 3647—71 включает 19 зернистостей (от № 200 до № 3).

В табл. 1.16 приведены обозначения зернистостей микропорошков по ГОСТ 3647—71 и по стандартам FEPA. Для зернистостей по ГОСТ 3647—71 указаны размеры зерна основной фракции, для зернистости по стандартам FEPA приведены среднемедианные размеры зерен и размеры максимальных зерен.

При выборе зернистости, соответствующей обозначению, принятому в СССР, следует учитывать, что в стандартах FEPA одним и тем же обозначениям зернистости в сериях F и P соответствует различный размер зерен; например F400 имеет средний размер зерен 17,3 мкм, а P400 35 мкм. Поэтому, помимо обозначения зернистости, следует знать и среднемедианный размер зерен.

Рис. 1.7. Распределение размеров абразивных зерен по фракциям для шлифовального зерна и шлифовальных порошков

Массовое распределение размеров абразивных зерен описано законом нормального распределения (рис. 1.7).

$$y_м(x_i) = \frac{1}{\sigma_м \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x_i - \bar{x}_м)^2}{2\sigma_м^2}\right], \qquad (1.1)$$

где x_i — текущий размер; $\bar{x}_м$ — средневероятный размер при распределении по массе (в дальнейшем будем называть его средним); $\sigma_м$ — среднее квадратичное отклонение размеров зерен при распределении по массе.

На рис. 1.8 показаны участки под кривой распределения, характеризующие соотношение между массами зерен в различных фракциях в соответствии с ГОСТ 3647—71. Массовую долю в заданных пределах x_1 и x_2, предполагая, что распределение их по размерам нормальное, определяют по формуле

$$P = 0{,}5\left[\Phi\left(\frac{x_2 - \bar{x}_м}{\sqrt{2}\,\sigma_м}\right) - \Phi\left(\frac{x_1 - \bar{x}_м}{\sqrt{2}\,\sigma_м}\right)\right], \qquad (1.2)$$

где $\Phi\left(\frac{x - \bar{x}}{\sqrt{2}\,\sigma_м}\right)$ — функция Крампа.

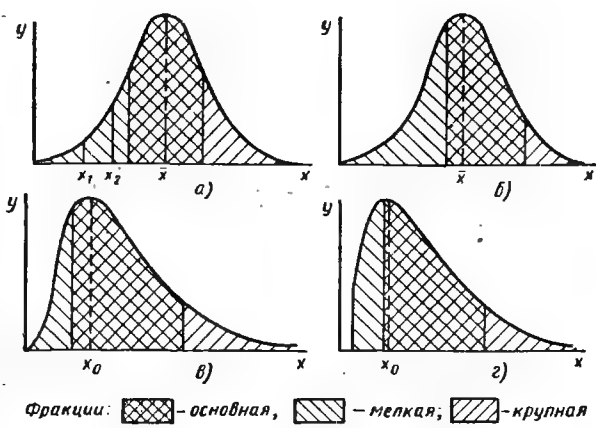


Рис. 1.8. Распределение размеров алмазных зерен по фракциям:

а — для шлифпорошков широкого и узкого диапазонов зернистостей; *б* — для микропорошков зернистостей 3/2 и выше; *в* — для микропорошков зернистостей 1/0 и 2/1 и субмикропорошков зернистостей 0,5/0,3 и 1/0,5; *г* — для субмикропорошков зернистостей 0,1/0 и 0,3/0,1

В результате анализа распределений размеров зерен шлифпорошков и шлифзерна наиболее распространенных зернистостей с содержанием основной фракции 45—40% (индекс Н) получены формулы:

для средневероятностного размера

$$\bar{x}_м = 10{,}6N, \tag{1.3}$$

где N — зернистость по ГОСТ 3647—71;

для среднего квадратичного отклонения

$$\sigma_м = 0{,}17\bar{x}. \tag{1.4}$$

Практические расчеты в этих случаях можно производить по формуле

$$P = 0{,}5\left[\Phi\left(0{,}39\frac{x_2}{N} - 0{,}42\right) - \Phi\left(0{,}39\frac{x_1}{N} - 0{,}42\right)\right]. \tag{1.5}$$

Форма и размер алмазных зерен и зерен из других синтетических сверхтвердых материалов

Алмазные порошки представляют собой совокупность алмазных зерен различной величины и формы в виде монокристаллов, их осколков, сростков и поликристаллов. Зерна синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов не имеют строгой формы. В связи с этим размер зерна по ГОСТ 9206—70 определяют как полусумму длины и ширины прямоугольника, условно описанного вокруг проекции зерна таким образом, чтобы большая сторона прямоугольника соответствовала наибольшей длине проекции зерна (рис. 1.9). Таким образом, согласно ГОСТ 9206—70, размер зерен

$$d = 0{,}5\,(x + a).$$

Из многократных наблюдений следует, что контуры зерен удовлетворительно геометрически описываются эллипсоидами вращения, большая ось которых проходит через наибольшую диагональ x зерен. Если предположить, что зерно описывается в первом приближении эллипсоидом вращения, то большая ось эллипсоида равна x, а меньшая αx, причем измерения, выполненные различными авторами, показывают, что в среднем $\alpha = 0{,}6 \div 0{,}8$.

Алмазные порошки в зависимости от размера зерен, метода их получения и контроля делят на две группы: шлифпорошки, получаемые путем рассева на ситах, с контролем зернового состава ситовым методом, и микропорошки, получаемые путем классификации с использованием жидкости и контролем зернового состава микроскопическим методом. Зерновой состав алмазных порошков характеризуется совокупностью фракций: основной преобладающей по количеству, и побочных — крупной и мелкой, выраженных в процентах (шлифпорошков — по массе, микропорошков — по числу зерен).

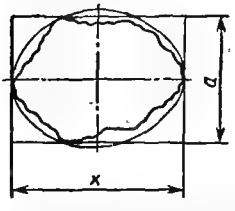


Рис. 1.9. Характерные размеры алмазного зерна; описание формы зерна прямоугольником и эллипсом

Зернистость алмазов и других синтетических сверхтвердых материалов обозначают дробью, у которой числитель соответствует наибольшему, а знаменатель наименьшему размерам зерен основной фракции. Размер зерен в каждой фракции шлифпорошков определяют размерами сторон ячеек двух контрольных сит, из которых через верхнее сито зерна должны проходить, а на нижнем задерживаться.

В табл. 1.17 приведены нормы зернового состава шлифпорошков.

За размер зерна микропорошков и субмикропорошков в соответствии с ГОСТ 9206—70 принимают полусумму длины и ширины прямоугольника, условно описанного вокруг проекции зерна. Зерновой состав микропорошков представлен в табл. 1.18.

Таблица 1.17

Зерновой состав шлифпорошков

Зернистость	Масса фракций				Характеристики распределения	
	Крупная		Основная	Мелкая		
	Должно проходить через сито 100%	Может задержаться на сите не более 15%	Должно задержаться на сите не менее 70%	Может проходить через сито не более 3%	$\bar{x}_м$, мкм	$\sigma_м$, мкм
	Номинальный размер ячейки сита в свету, мкм					
Широкий диапазон зернистостей						
400/250	500	300	250	200	315	65
250/160	315	250	160	125	200	40
160/100	200	160	100	80	125	25
100/63	125	100	63	50	79	16
63/40	80	63	40	—	51	10
Узкий диапазон зернистостей						
630/500	800	630	500	400	565	63
500/400	630	500	400	315	450	50
400/315	500	400	315	250	358	40
315/250	400	315	250	200	283	32
250/200	315	250	200	160	225	25
200/160	250	200	160	125	180	20
160/125	200	160	125	100	138	16
125/100	160	125	100	80	112	13
100/80	125	100	80	63	90	10
80/63	100	80	63	50	72	8
63/50	80	63	50	40	57	7
50/40	63	50	40	—	45	5

Таблица 1.18

Зерновой состав микропорошков

Зернистость	Содержание фракций по количеству зерен		
	крупной 5%, не более	основной 65%, не менее	мелкой 30%, не более
	Размер зерен мкм		
60/40	80 и мельче	От 60 до 40	Не менее 20
40/28	60 То же	» 40 » 28	То же 14
28/20	40 »	» 28 » 20	» 10
20/14	28 »	» 20 » 14	» 7
14/10	20 »	» 14 » 10	» 5
10/7	14 »	» 10 » 7	» 3
5/3	7 »	» 7 » 5	» 2
3/2	5 »	» 5 » 3	» 1
2/1	3 »	» 2 » 1	2 и мельче
1/0	2 »	От 1 и мельче не менее 95%	1 и мельче

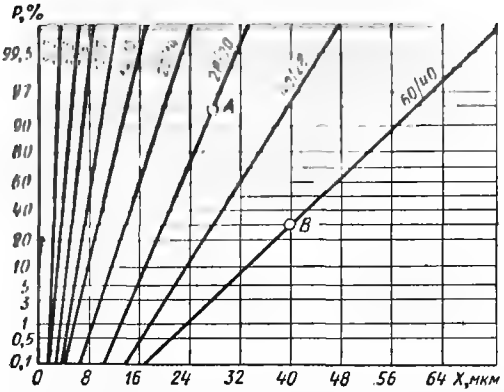


Рис. 1.10. Номограмма для расчета зернового состава микропорошков зернистостью $^3/_2$ и выше

Для особо точной обработки деталей применяют субмикропорошки, зерновой состав которых приведен в табл. 1.19.

Распределение размеров зерен по массе для шлифпорошков и для большинства микропорошков по количеству подчиняется закону нормального распределения. Средний размер зерен шлифпорошков, как показывают расчеты, можно определять по формуле

$$\bar{x} = \sqrt{x_{нб} x_{нм}}, \qquad (1.6)$$

где $x_{нб}$, $x_{нм}$ — соответственно наибольшие и наименьшие размеры зерен в основной фракции.

Среднее квадратичное отклонение для широкого диапазона зернистостей $\sigma_м \approx 0{,}2\bar{x}$, а для узкого диапазона $\sigma_м \approx 0{,}11\bar{x}$. Массовая доля P в заданных пределах x_1 и x_2 в предположении, что распределение их по размерам нормальное, определяется по формуле (1.5).

В практике инженерных расчетов может понадобиться осуществить переход от параметров кривой распределения по массе зерен $\bar{x}_м$ и $\sigma_м$ к параметрам кривой распределения по их количеству $\bar{x}$ и σ. Построение значительного числа кривых распределения показывает, что с достаточной для практики точностью можно воспользоваться переходными коэффициентами:

для порошков широкого диапазона зернистости

$$\bar{x} = 0{,}88\bar{x}_м \text{ и } \sigma = 0{,}94\sigma_м;$$

для порошков узкого диапазона зернистости

$$\bar{x} = 0{,}96\bar{x}_м \text{ и } \sigma \approx \sigma_м.$$

Для написания закона распределения по количеству зерен в случае, когда задано их распределение по массе, можно в первом приближении пользоваться формулой (1.1) с подстановкой значений $\bar{x}$ и σ по формуле (1.1). Для расчета зернового состава микропорошков приведена номограмма (рис. 1.10).

Пример. Для алмазного микропорошка 28/20 вычислить массовую долю зерен основной фракции в пределах $x_1 = 28$ мкм, $x_2 = 20$ мкм.

На шкале размеров зерен номограммы рис. 1.10 находим точки 28 и 20. Из этих точек движемся вверх до линии, соответствующей зернистости 28/20 и по шкале ординат определяем координаты точек A. Для $x_1 = 28$ мкм $P_A = 95\%$, для $x_2 = 20$ мкм $P = 30\%$. Весовую долю зерен в интересующих пределах микропорошка данной зернистости определяют как разность накопленных вероятностей

$$P = 95\% - 30\% = 65\%.$$

Для алмазного микропорошка 60/40 в пределах от $x_1 = 65$ мкм до $x_2 = 40$ мкм (точка B) содержаться $P = 99\% - 30\% = 69\%$.

Таблица 1.19

Зерновой состав субмикропорошков

Зернистость	Содержание фракций по числу зерен					
	крупной		основной		мелкой	
	Размер зерен, мкм	%, не более	Размер зерен, мкм	%, не менее	Размер зерен, мкм	%, не более
1/0,5	2 и мельче	2	1—0,5	60	Мельче 0,5	38
0,5/0,3	0,7	1	0,5—0,3	50	» 0,3	49
0,3/0,1	0,5	1	0,3—0,1	50	» 0,1	49
0,1/0	0,3	1	0,1 и мельче	99		—

Глава 2

ШЛИФОВАНИЕ АБРАЗИВАМИ И АЛМАЗНЫМИ КРУГАМИ

§ 2.1. Технологические разновидности процесса шлифования

По характеру обрабатываемых поверхностей технологические схемы шлифования можно разделить на три основных вида: а) обработка наружных и внутренних поверхностей вращения (круглое шлифование); б) обработка плоских поверхностей (плоское шлифование); в) обработка сложных поверхностей.

Главным движением при всех видах шлифования является вращение шлифовального круга. Скорость главного движения (скорость резания) определяют по формуле

$$v = \frac{\pi D n}{60 \cdot 1000} \approx 0{,}525 \cdot 10^{-4} D n,$$

где D — диаметр шлифовального круга, мм; n — частота вращения шлифовального круга, об/мин.

Движением подачи при всех видах шлифования является взаимное относительное перемещение шлифовального круга и детали.

Обработка поверхностей вращения (круглое шлифование)

К процессам круглого шлифования относится обработка цилиндрических, конических и фасонных, гладких и ступенчатых, сквозных и глухих, наружных и внутренних поверхностей вращения. При круглом шлифовании обрабатываемая деталь вращается вокруг своей оси. Скорость вращения детали (круговую подачу, м/мин) определяют по формуле

$$v_1 = \frac{\pi D_1 n_1}{1000} \approx \frac{D_1 n_1}{318}, \qquad (2.1)$$

где D_1 — максимальный диаметр обработки (диаметр заготовки при наружном шлифовании, диаметр обработанной поверхности при внутреннем шлифовании, мм; n_1 — частота вращения детали, об/мин.

Кроме того, при круглом шлифовании имеют место относительное взаимное перемещение шлифовального круга и детали вдоль ее оси (продольная подача) и нормально к оси детали (поперечная подача). Возможна также подача под углом к оси детали.

Продольная подача s_1 может быть измерена в долях ширины шлифовального круга за оборот детали, в миллиметрах на оборот детали, в миллиметрах в минуту, в метрах в минуту.

Поперечная подача s_2 и подача под углом могут быть измерены в миллиметрах на оборот детали, в миллиметрах на ход стола или шлифовальной бабки, в миллиметрах на двойной ход стола или шлифовальной бабки, в миллиметрах в минуту.

Многопроходное шлифование методом продольной подачи производят, как правило, с частичным выходом круга из контакта ($l_2 \approx 0{,}3\ H$) после каждого хода. Если обрабатываемая поверхность с одного или обоих концов ограничена уступами, на заготовке предварительно выполняют канавку, отделяющую уступ от обрабатываемой поверхности и обеспечивают выход круга l_2, величина которого в этом случае будет определяться шириной канавки. После каждого хода (двойного хода) детали (круга) круг подается на заготовку на величину $s_2 = t$. В конце обработки один или несколько проходов могут быть выполнены без поперечной подачи (выхаживания) с целью достижения высокой точности и наименьшей шероховатости.

При однопроходном шлифовании (глубинное шлифование, шлифование установленным кругом) весь припуск $h = t$ снимают за один ход. Для улучшения работы абразивных зерен круг заправляют на конус или уступами. Однопроходное шлифование более производительно, чем многопроходное, однако не обеспечивает такой высокой точности, как многопроходное.

При обработке методом поперечной подачи шлифовальный круг равномерно подается на деталь со скоростью s_2 (мм/мин). В конце обработки шлифование можно в течение времени T_1 вести без подачи (выхаживание) для достижения более высокой точности и наименьшей шероховатости поверхностей детали. Этот метод более производителен по сравнению с методом продольной подачи. Точность обработки этим методом существенно зависит от геометрической точности круга, в связи с чем к последнему предъявляют повышенные требования. Круг необходимо чаще править, чем при обработке методом продольной подачи. С помощью этого метода можно обрабатывать короткие конические и фасонные поверхности кругами соответствующего профиля. При шлифовании цилиндрических поверхностей кругу иногда для повышения точности обработки и снижения шероховатости обрабатываемой поверхности сообщают осциллирующее возвратно-поступательное движение.

Круглое наружное шлифование в центрах (в патроне). При круглом наружном шлифовании в центрах в заготовке предварительно выполняют центровые отверстия. Диаметр шлифовального круга D не зависит от диаметра обрабатываемой поверхности и определяется прочностью круга, параметрами станка, технологическими факторами обработки. Круглое наружное шлифование в центрах можно производить как периферией круга (в основном), так и его торцом. Для уменьшения теплообразования в зоне контакта шлифовального круга с деталью при работе торцом круг может быть повернут на 2—4°. Многопроходное торцовое шлифование производят с частичным выходом круга из контакта после каждого прохода на величину $l_2 = (0{,}3 \div 0{,}7)\ \dfrac{D-d}{2}$ (d — внутренний диаметр шлифовального круга).

Характеристика основных схем круглого наружного шлифования в центрах (в патроне) приведена в табл. 2.1. Кроме схем, указанных в табл. 2.1, можно также использовать их различные комбинации.

В табл. 2.1—2.10 обозначено: m_1 — число двойных ходов выхаживания; m_2 — число проходов (уступов); T_1 — время выхаживания, мин; T_2 — время переключения направления подачи, мин; l_1 и l_2 — недовод и перебег круга, мм; k — коэффициент, учитывающий снижение фактической глубины шлифования по сравнению с номинальной вследствие отжатия круга и его износа.

Круглое наружное бесцентровое шлифование. При наружном бесцентровом шлифовании заготовку не закрепляют в центрах или в патроне, а базируют по обрабатываемой или по обработанной поверхности. Заготовка получает вращение от ведущего круга, окружная скорость которого в 60—100 раз меньше, чем скорость шлифующего круга. Шлифовальный круг вращается, как правило, в ту же сторону, что и деталь. Поскольку сила трения между деталью и шлифующим кругом меньше, чем между деталью и ведущим кругом, она вращается практически со скоростью ведущего круга. Вращение детали может также осуществляться с помощью магнитной планшайбы, на которой она базируется торцом и удерживается силами магнитного притяжения. В других случаях заготовку базируют на направляющей линейке, на вращающихся роликах или на неподвижных (жестких) опорах.

Круглое наружное шлифование в центрах

Таблица 2.1

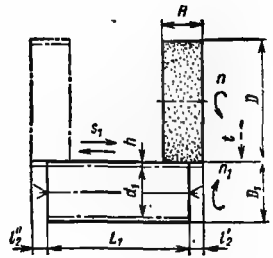
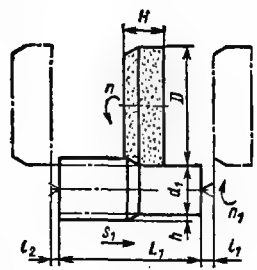
Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Периферией круга методом продольной подачи	Многопроходное		При поперечной подаче t_r мм/ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''-H}{1000s_1}+T_в\right)\times\left(\frac{kh}{t}+2m_1\right)$; при поперечной подаче t_r мм/дв. ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''-H}{500s_1}+2T_в\right)\times\left(\frac{kh}{t}+m_1\right)$; s_1 — подача, м/мин	Черновая и чистовая обработка поверхностей сравнительно большой длины ($L_1 > H$) [валы, оси, сверла, протяжки] При обработке конических поверхностей заготовка поворачивается на угол, равный половине угла конуса
	Однопроходное (глубинное)		$\frac{L_1+l_1+l_2+H}{s_1}$ При шлифовании поверхностей с уступом $\frac{L_1+l_1}{s_1}+T_{вв}$ s_1 — подача мм/мин	Черновая и получистовая обработка деталей повышенной жесткости При обработке конусов заготовка поворачивается на угол, равный половине угла конуса

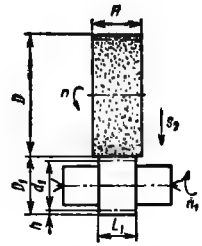
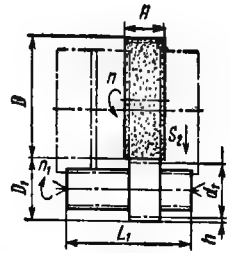
Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Периферией круга методом радиальной поперечной подачи (врезное в упор)	Однопроходное		При подаче s_5, мм/мин $\frac{kh + l_1}{s_5} + T_1$; при подаче s_5, мм/об. дет $\frac{kh + l_1}{s_5 n_1} + T_1$	Черновая и чистовая обработка относительно коротких поверхностей ($B_1 < H$) деталей повышенной жесткости (шейки валов, цапфы, бурты, кулачки, заготовки шестерен); обработка конических и фасонных поверхностей кругами соответствующего профиля
	Многопроходное (уступами)		При подаче s_5, мм/мин $\left(\frac{kh + l_1}{s_5} + T_1' + T_2\right) m_2$; при подаче s_5, мм/об. дет. $\left(\frac{kh + l_1}{s_5 n_1} + T_1' + T_2\right) m_2$, где T_1' — время выхаживания в конце каждого хода, мин	Черновая обработка ступенчатых поверхностей относительно большой длины ($B_1 > H$) деталей повышенной жесткости (ступенчатые валы, блоки шестерен, вал-шестерни, кулачковые и коленчатые валы)

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Периферией круга методом тангенциальной подачи (врезное на проход)	Однопроходное		$\frac{h_1' + l_1' + l_2'}{s_0}$ где s_0 — подача, мм/мин	Черновая и чистовая обработка относительно коротких поверхностей ($L_1 < H$), в том числе конических и фасонных. Преимущество методов в том, что в конце обработки съем постепенно уменьшается, и в момент совпадения осей круга и детали происходит выхаживание. Схема позволяет расположить шлифовальную бабку внизу станка, увеличив жесткость системы и облегчив автоматизацию
	Многопроходное (уступами)		$\left(\frac{h_1' + l_1' + l_2'}{s_0} + T_2\right) m_2,$ где s_0 — подача, мм/мин	

Продолжение табл. 2.1

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
С подачей под углом	Врезное		При подаче s_2, мм/мин $\frac{kh + l_1}{s_2 \cos\beta} + T_1$; при подаче s_2, мм/об. дет. $\frac{kh + l_1}{s_2 n_1 \cos\beta} + T_1$	Черновая и чистовая обработка одновременно двух сопряженных поверхностей и более, в том числе и фасонных, например деталей типа ступенчатых валов относительно небольшой длины $\left(L_1 < \frac{H'}{\cos\beta}\right)$ и с относительно небольшим уступом $\left(\frac{D_1' - d_1}{2} < \frac{H}{\sin\beta}\right)$
Круглое шлифование торцом круга	Многопроходное		При поперечной подаче t, мм/ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2 - D}{1000 s_1} + T_2\right) \times \left(\frac{kh}{t} + 2m_1\right)$; при поперечной подаче t, мм/дв ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2 - D}{500 s_1} + 2T_2\right) \times \left(\frac{kh}{t} + m_1\right)$, где s_1 — подача, м/мин	Чистовая обработка больших поверхностей кругами малого размера, например алмазное шлифование бочки валка прокатного стана, шпинделя координатно-расточного станка, колонны радиально-сверлильного станка

Продолжение табл. 2.1

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Круглое шлифование торцом круга	Однопроходное (глубинное)		$\frac{L_1 + l_1 + l_2 + D}{s_1}$ где s_1 — подача, мм/мин	Черновая обработка больших поверхностей того же типа, что и в предыдущей схеме

Таблица 2.2

Круглое наружное бесцентровое шлифование

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом продольной подачи	С поворотом ведущего круга		При подаче на проход $\frac{L_1 + H}{\pi D_2 n_2 q \sin \alpha}$	Обработка гладких цилиндрических деталей в массовом производстве (штифты, пальцы, ролики, подшипниковые кольца). Способ характеризуется высокой производительностью

Продолжение табл. 2.2

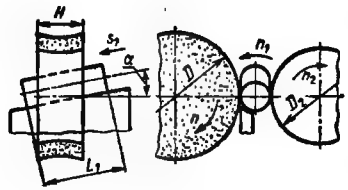
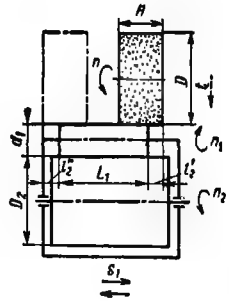
Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом продольной подачи	С наклоном направляющей линейки		При непрерывной подаче заготовок $\frac{L_1}{\pi D_2 n_2 \eta \sin\alpha}$	Обработка гладких цилиндрических деталей в массовом производстве (штифты, пальцы, ролики, подшипниковые кольца). Способ характеризуется высокой производительностью
	С подвижным ведущим кругом		$\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2'' - H}{500s} + 2T_2\right) \times \left(\frac{\varepsilon n}{t} + m_1\right)$	Обработка цилиндрических и конических деталей с малой конусностью (шпильки, пальцы, цилиндрические и конические штифты и хвостовики). Способ менее производителен, чем предыдущий

	Схема шлифования		Машинное время, мин	Применение
Методом поперечной подачи	С ведущим кругом и радиальной подачей		$\frac{kh}{s_2} + T_1$, где s_2 — подача, мм/мин	Обработка цилиндрических, конических, ступенчатых и фасонных поверхностей (цапфы крестовины, стержни клапанов, сферические пальцы) сравнительно небольших размеров ($L_1 < H$)
	С ведущим кругом и тангенциальной подачей		$\frac{h^* + l_1^* + l_2^*}{s_2}$, где s_2 — подача, мм/мин	То же; при специальной наладке возможна обработка плоских поверхностей

Продолжение табл. 2.2

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом поперечной подачи	С магнитной планшайбой		$\frac{kh + l_1}{s_2} + T_1$, где s_2 — подача, мм/мин	Обработка деталей повышенной точности и небольшой длины ($L_1 < H$), например подшипниковых колец. При данном способе погрешности зажима и радиальное биение шпинделя не влияют на точность обработки
Методом затяжки	С упором		—	Обработка цилиндрических и конических деталей относительно небольших ($L_1 < H$) размеров (конус сверла, стержень клапана)

При вращении заготовки от ведущего круга ее скорость (круговую подачу) определяют по формуле

$$v_1 = \frac{\pi D_2 n_2 \eta}{1000} \cos\alpha \approx \frac{D_2 n_2 \eta}{318} \cos\alpha, \qquad (2.2)$$

где D_2 — диаметр ведущего круга, мм; n_2 — частота вращения ведущего круга, об/мин; η — коэффициент, учитывающий проскальзывание в контакте ведущего круга с заготовкой; α — угол наклона оси ведущего круга или направляющей линейки к оси детали, обычно $\alpha = 2 \div 6°$.

Скорость продольного перемещения (мм/мин) заготовки s_1 определяют по формуле

$$s_1 = \pi D_2 n_2 \eta \sin\alpha.$$

Характеристика основных схем бесцентрового наружного шлифования приведена в табл. 2.2.

Внутреннее шлифование. К процессам внутреннего шлифования относятся обработка цилиндрических, конических и фасонных отверстий.

При внутреннем шлифовании в патроне и бесцентровом шлифовании круговая подача осуществляется за счет вращения детали со скоростью v_1, которую определяют по формулам (2.1) при шлифовании в патроне и (2.2) при бесцентровом шлифовании. При внутреннем планетарном шлифовании деталь неподвижна, а шпиндель шлифовального круга совершает вращение вокруг оси обрабатываемого отверстия. В этом случае в формуле (2.1) n_1 означает частоту вращения шпинделя вокруг оси отверстия в минуту. Диаметр шлифовального круга при внутреннем шлифовании ограничен диаметром отверстия; его выбирают в пределах $D = (0{,}5 \div 0{,}8)\, D_1$.

Характеристика основных схем внутреннего шлифования в патроне приведена в табл. 2.3, бесцентрового внутреннего шлифования в табл. 2.4, планетарного шлифования в табл. 2.5.

Обработка плоских поверхностей (плоское шлифование)

Плоское шлифование характеризуется наличием продольной подачи s_1 (прямолинейной или круговой) и (или) поперечными подачами: s_2 — вдоль шлифуемой поверхности и (или) s_3 — нормально к шлифуемой поверхности. Продольную подачу (скорость детали) измеряют в метрах в минуту (м/мин) или миллиметрах в минуту (мм/мин). Поперечную подачу s_2 осуществляют после каждого хода (двойного хода) детали относительно круга и измеряют в миллиметрах на ход (мм/ход) или на двойной ход (мм/дв. ход) стола станка. Поперечную подачу s_3 осуществляют после каждого хода (двойного хода) детали относительно круга и измеряют в миллиметрах на ход (мм/ход) и на двойной ход (мм/дв. ход) стола станка.

Шлифование выполняют периферией или торцом круга. Шлифование периферией можно выполнять как с поперечной подачей (когда ширина обрабатываемой поверхности больше ширины круга), так и без таковой. В том и другом случае припуск можно снимать как за несколько ходов стола станка, так и за один ход (глубинное шлифование). Шлифование торцом также можно выполнять как с поперечной подачей (когда ширина обрабатываемой поверхности больше диаметра круга), так и без поперечной подачи. В обоих случаях припуск можно снимать как за несколько ходов, так и за один ход (глубинное шлифование).

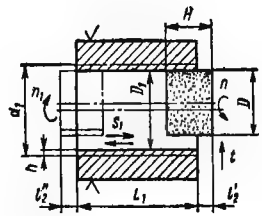
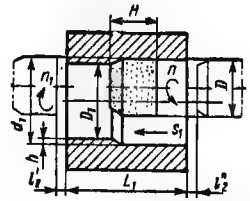
При шлифовании торцом поперечные колебания шлифовального шпинделя в меньшей мере влияют на рельеф обработанной поверхности, в связи с чем при этом способе шлифования получается более высокая точность и небольшая шероховатость.

Глубинное шлифование в ряде случаев является более производительным по сравнению с многопроходным, однако этот способ обеспечивает более низкую точность обработки и применим только при достаточной жесткости системы станок—приспособление—инструмент—деталь (СПИД).

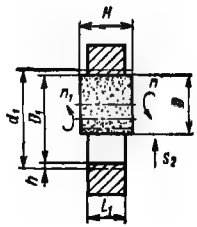
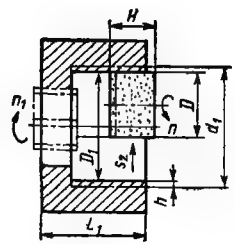
Характеристика основных схем плоского шлифования приведена в табл. 2.6 и 2.7.

Внутреннее шлифование в патроне

Таблица 2.9

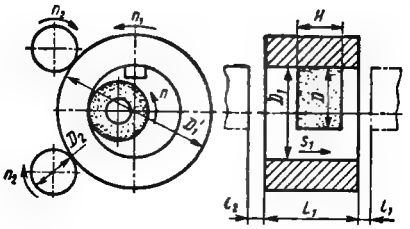
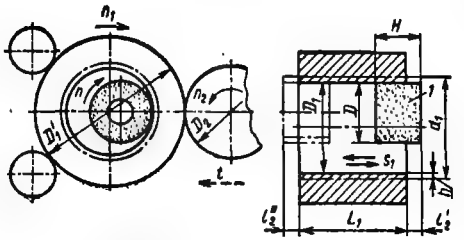
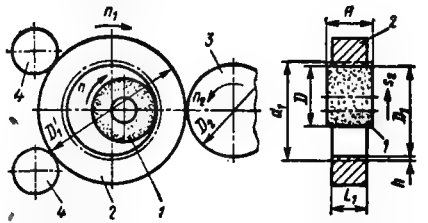
Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом продольной подачи	Многопроходное		При поперечной подаче t, мм/ход $\left(\frac{L_1+l_2''-l_2''-H}{1000s_1}+T_2\right)\times\left(\frac{kh}{t}+2m_1\right)$ При поперечной подаче t, мм/дв. ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''-H}{500s_1}+T_2\right)\times\left(\frac{kh}{t}+m_1\right)$, где s_1 — подача, мм/мин	Черновая и чистовая обработка сквозных и глухих отверстий сравнительно большой ($L_1 > H$) длины (посадочные отверстия шкивов, зубчатых колес, фрез, долбяков; внутренний диаметр гильз, цилиндров
	Однопроходное (глубинное)		При шлифовании сквозных отверстий (на проход) $\frac{L_1+l_1+l_2+H}{s_1}$; при шлифовании глухих или ступенчатых отверстий $\frac{L_1+l_1}{s_1}$	Черновая обработка сквозных и глухих отверстий в деталях повышенной жесткости (ступицы, толстостенные цилиндры, втулки). В связи с пониженной жесткостью внутришлифовального шпинделя метод для точной обработки применять не рекомендуется

Продолжение табл. 2.3

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом поперечной подачи (врезанием)	Однопроходное		$\frac{l_1 + kh}{s_2} + T_1$, где s_2 — подача, мм/мин	Черновая и чистовая обработка сквозных и глухих отверстий небольшой длины ($L_1 < H$) в деталях повышенной жесткости (бандажи, кольца, посадочные отверстия шкивов, зубчатых колес), обработка конических и фасонных отверстий кругами соответствующего профиля. Метод характеризуется высокой производительностью и повышенными требованиями к точности кругов и жесткости системы СПИД
	Многопроходное (уступами)		$\left(\frac{kh + l_1}{s_2} + T_1'\right) m_1$, где s_2 — подача, мм/мин, $\left(\frac{kh + l_1}{s_2 n_1} + T_1'\right) m_2$, s_2 — подача, мм/об, T_1' — время выхаживания в конце каждого прохода, мин	Обработка ступенчатых отверстий в деталях повышенной жесткости

Внутреннее бесцентровое шлифование

Таблица 2.4

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом продольной подачи	На двух роликах		При индивидуальной подаче заготовок $\frac{L_1 + l_1 + l_2 - H}{s_1}$; при непрерывной подаче заготовок L_1/s_1, где s_1 — подача, мм/мин	Черновое и получистовое шлифование в серийном и массовом производстве цилиндрических деталей типа колец, втулок, цилиндров с предварительно или окончательно обработанной наружной поверхностью
	На трех роликах		При поперечной подаче, мм/ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2'' - H}{1000 s_1} + T_2\right) \times \left(\frac{kh}{t} + 2m_1\right)$; при поперечной подаче t, мм/дв. ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2'' - H}{500 s_1} + 2T_2\right) \times \left(\frac{kh}{t} + m_1\right)$, где s_1 — подача, мм/мин	
Методом поперечной подачи	На роликах		$\frac{kh + l_1}{s_2} + T_1$, где s_2 — подача, мм/мин	Черновое и чистовое шлифование деталей достаточной жесткости и относительно небольшой длины ($L_1 \leqslant H$) типа колец, втулок, с окончательно обработанной наружной поверхностью

Планетарное внутреннее шлифование

Таблица 2.5

		Схема шлифования	Машинное время, мин	Применение
Методом продольной подачи	Многопроходное		При поперечной подаче t, мм/ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''-H}{1000s_1}+T_2\right)\times\left(\frac{kh}{t}+2m_1\right)$; при поперечной подаче t в мм/дв. ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''-H}{500s_1}+T_2\right)\times\left(\frac{kh}{t}+m_1\right)$, где s_1 — подача, м/мин	Черновая и чистовая обработка сквозных гладких отверстий относительно большой длины ($L_1 > H$) в корпусных деталях
	Однопроходное глубинное		При шлифовании сквозных отверстий (на проход) $\frac{L_1+l_1+l_2+H}{s_1}$; при шлифовании глухих или ступенчатых отверстий (в упор) $\frac{L_1+l_1}{s_1}+T_1$, где s_1 — подача, мм/мин	Черновая и чистовая обработка гладких и ступенчатых сквозных и глухих отверстий относительно большой длины ($L_1 > H$) в корпусных деталях повышенной жесткости

Продолжение табл. 2.5

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом продольной подачи	Многопроходное		$\left(\frac{kh + l_1}{s_2} + T_1'\right) m_2$, s_2 — подача мм/мин	Обработка ступенчатых отверстий
Методом поперечной подачи	Однопроходное		$\frac{kh + l_1}{s_2} + T_1$, где s_2 — подача, мм/мин	Черновая и чистовая обработка относительно неглубоких отверстий ($L_1 < H$), в том числе конических, фасонных, в корпусных деталях повышенной жесткости

Плоское шлифование периферией круга

Таблица 2.6

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
С прямолинейной продольной подачей	Многопроходное (с малой глубиной)		При поперечной подаче $s_3 = t$, мм/ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2''}{1000 s_1} + T_3\right) \times \left(\frac{kh}{t} + 2m_1\right)$; при поперечной подаче, мм/дв. ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2''}{500 s_1} + 2T_3\right) \times \left(\frac{kh}{t} + m_1\right)$, где s_1 — подача, м/мин	Черновая и чистовая обработка деталей относительно малой ширины ($B < H$): шпонок, линеек, клиньев, шлицевых валов, измерительных плиток, деталей с буртами, плоских и призматических направляющих
	Однопроходное глубинное		$\frac{L_1 + l_1 + l_2}{s_1}$, где s_1 — подача, мм/мин	

Продолжение табл. 2.6

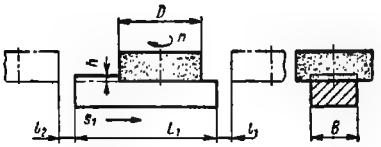
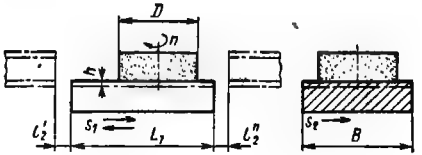
Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
С прямолинейной продольной подачей и поперечной подачей s_2	Многопроходное (с малой глубиной)		При подаче s_1, мм/ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''}{1000s_1}+T_в\right)\times\left(\frac{B}{s_2}+2m_1\right)\frac{kh}{t}$; при подаче s_2, мм/дв. ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''}{500s_1}+2T_в\right)\times\left(\frac{B}{s_2}+m_1\right)\frac{kh}{t}$ где s_1 — подача, м/мин;	Черновая и чистовая обработка деталей относительно большой ширины ($B > H$), а также комплектов деталей (измерительные плитки, разметочные плиты, столы, плоскости разъема корпусных деталей)
С прямолинейной продольной подачей и поперечной подачей s_2	Глубинное		При подаче s_2, мм/ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''}{s_1}+T_в\right)\frac{B+H}{s_2}$; при подаче s_2, мм/дв. ход $\left(\frac{L_1+l_2'+l_2''}{s_1}+T_в\right)\frac{2(B+H)}{s_2}$, где s_1 — подача, мм/мин	Черновая обработка деталей относительно большой ширины (плиты, столы, плоскости разъема корпусных деталей)

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
С круговым движением подачи	—		$1/(mn_1)$, где n_1 — скорость вращения стола, об/мин; m — число одновременно установленных деталей	Обработка деталей небольших размеров (торцы колец, втулок) в серийном и массовом производстве

Плоское шлифование торцом круга

Таблица 2.7

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
С прямолинейной продольной подачей без поперечной подачи	Многопроходное (с малой глубиной)		При поперечной подаче $s_s = t$, мм/ход $\left(\frac{L_1 + l_2'' + l_2' + D}{1000 s_1} + T_2\right) \times \left(\frac{kh}{t} + m_1\right)$; при поперечной подаче $s_s = t$, мм/дв. ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2'' + D}{500 s_1} + 2T_2\right) \times \left(\frac{kh}{t} + m_1\right)$	Черновое и чистовое шлифование плоских поверхностей деталей с шириной обработки меньше диаметра круга ($B < D$). Заточка режущего инструмента

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
С прямолинейной продольной подачей без поперечной подачи	**Однопроходное (глубинное)**		$\frac{L_1 + l_1 + l_2 + D}{s_1}$ При непрерывной подаче заготовки $(L_1 + l_1)/s_1$, где l_1 — расстояние между заготовками; s_1 — подача, мм/мин	То же
С прямолинейной продольной подачей и поперечной подачей	**Многопроходное (с малой глубиной)**		При подаче s_2, мм/ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2'' + D}{1000 s_1} + T_2\right) \times$ $\times \left(\frac{2B}{s_2} + 2m_1\right) kh/t$; при подаче s_2, мм/дв. ход $\left(\frac{L_1 + l_2' + l_2'' + D}{1000 s_1} + T_2\right) \times$ $\times \left(\frac{2B}{s_2} + 2m_1\right) kh/t$, где s_1 — подача, м/мин; s_2 — мм/проход	Черновое и чистовое шлифование больших плоских поверхностей ($L_1 > D$, $B > D$): столов, разметочных плит, штампов, плоскостей разъема корпусных деталей

Продолжение табл. 2.7

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
С прямолинейной продольной подачей и поперечной подачей	Глубинное		$\frac{L_1 + l_2'' + l_2'' + D}{s_1} \frac{B + D}{s_2}$, где s_1 — подача, мм/мин; s_2 — подача, мм/ход	То же
С круговым движением подачи	Глубинное		$1/mn_1$, где n_1 — частота вращения подающего устройства, об/мин; m — число одновременно установленных деталей	Обработка некрупных деталей (торцы колец, втулок, шатунов, крестовин; плоскости разъема корпусных деталей) в серийном и массовом производстве

Обработка сложных фасонных поверхностей (профильное шлифование)

К процессам профильного шлифования относятся обработка резьбо- и зубообразующих поверхностей, шлифование сферы и сложной фасонной поверхности при относительном перемещении обрабатываемой детали и шлифовального круга по копиру или при помощи привода от кулачка, а также шлифование по шаблону плоских деталей со сложным контуром.

Резьбошлифование (табл. 2.8) производят при изготовлении резьбонарезного инструмента (метчиков, гребенок, плашек и др.), резьбовых калибров, ходовых винтов, червяков, накатных роликов и других деталей с резьбой различного профиля. Шлифование резьб (наружной, внутренней и конической) выполняют по предварительно изготовленному профилю или выщлифовыванием на полную высоту профиля с помощью одно- или многониточных резьбошлифовальных кругов без предварительной обработки.

Шлифование резьбы однониточным кругом осуществляют за счет продольного поступательного движения детали вдоль шлифуемой резьбы относительно шлифовального круга, устанавливаемого под углом, равным углу подъема резьбы. Подачу на глубину шлифования производят на каждый ход стола. Способ применяют для шлифования всех видов резьб.

Шлифование резьбы многониточным кругом осуществляют за счет: а) поперечной подачи (врезания) круга с кольцевыми нитками на полную глубину шлифования при одновременном продольном перемещении детали на 1,3—3 шага резьбы (за 1,3—3 оборота детали); эту схему шлифования применяют для обработки наружных одно- и многозаходных и кольцевых резьб по длине меньших, чем высота шлифовального круга, в том числе резьб на деталях с буртиком; б) продольной подачи детали относительно рабочей поверхности круга с кольцевыми нитками вдоль шлифуемой резьбы. На профиле круга по высоте заправляют коническую заходную часть, которая производит предварительное и получистовое шлифование резьбы. Последние нитки полного кольцевого профиля круга производят чистовое шлифование. Шлифование производят за один проход. Рекомендуется применять составные (склеенные) шлифовальные круги, состоящие из двух-трех кругов: твердого — для предварительной обработки и мягкого — для чистого шлифования. Данную схему шлифования применяют для шлифования наружных одно- и многозаходных резьб, по длине больших, чем высота круга.

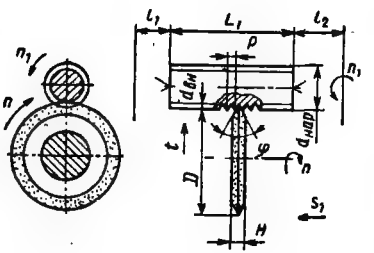
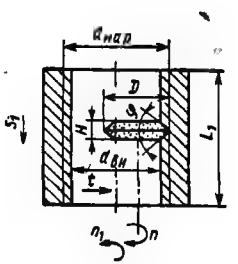
Аналогичным способом осуществляют обработку резьбы при бесцентровом резьбошлифовании, при котором подъем резьбы и перемещение заготовки в процессе шлифования выполняют за счет наклона опорного ножа и разворота ведущего круга.

Шлифование резьб многониточными кругами (с перекрещивающимися и параллельными осями деталей и круга) обеспечивает меньшую точность обработки, чем при использовании однониточных кругов, однако при этом достигается более высокая стойкость круга.

Зубошлифование (табл. 2.9) — отделочная обработка зубчатых колес шлифованием с применением абразивных кругов. Зубошлифование позволяет получить зубчатые колеса высокого класса точности с заданной шероховатостью рабочих поверхностей. Шлифование зубьев производят методами копирования и обкатывания.

Зубошлифование по методу копирования выполняют фасонными кругами, имеющими профиль, соответствующий профилю впадины между зубьями колеса. Кругу сообщают вращательное и возвратно-поступательное движение вдоль образующей зуба. Подачу на глубину шлифования выполняют периодически на каждый двойной ход круга. После обработки каждой впадины зуба осуществляют поворот колеса на заданный угол и производят правку шлифовального круга по шаблону. Зубошлифование по методу обкатывания осуществляют

Таблица 2.8

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Однониточным кругом с продольной подачей	Наружная резьба		$\left(\frac{L_1+l_2+l_1}{n_1 P}+T_2+T_3\right)\times\left(\frac{kh}{t}+m_1\right)$	Шлифование одно-, многозаходных, цилиндрических, конических и кольцевых резьб с метрическим, дюймовым, питчевым, трубным, трапецеидальным и другими профилями резьбы любой длины
	Внутренняя резьба			

Продолжение табл. 2.8

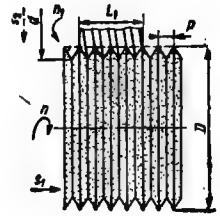
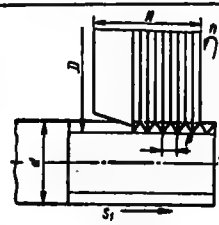
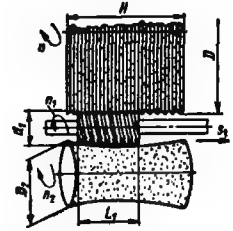
Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Многониточное наружное резьбошлифование с подачей	Продольной и поперечной		$\frac{L_1 + l_2 + l_1}{n_1 P}$	Шлифование одно-, многозаходных и кольцевых резьб, обработка резьбы на деталях с буртиком. На рабочем профиле круга заправляют коническую или ступенчатую заборную часть Шлифование резьбы шлифовальным кругом с кольцевыми нитками на проход или врезанием с базой по наружной поверхности диаметра резьбы
	Продольной			
				

Таблица 2.9

Схема шлифования			Машинное время, мин	Применение
Методом копирования	Фасонным кругом, соответствующим профилю впадины		$z\left(\frac{t_1}{n_1}+\frac{t_2}{n_2}+\frac{t_3}{n_3}+tT_2\right)$, где t_1, t_2, t_3 — число соответственно черновых, получистовых и чистовых ходов; n_1, n_2, n_3 — числа двойных ходов стола в минуту	Обработка цилиндрических зубчатых колес с прямым зубом. Процесс высокопроизводительный, однако точность обработки значительно ниже, чем при зубошлифовании по методу обкатывания
Методом обкатывания	Двумя тарельчатыми кругами Одним кругом 2П. или 3Т		$2z\left[\frac{L_p x}{n_0}\left(\frac{t_1}{s_1}+\frac{2lz}{s_2}+\frac{2l_4}{s_3}\right)+2lT_2\right]$, где $L_p = l + 2\sqrt{H'(D-H')} + 10$; n_0 — число обкатываний в минуту; s_1 — продольная подача на черновых проходах; s_2 — продольная подача на чистовых и получистовых проходах; l — длина зуба	Шлифование цилиндрических зубчатых колес с прямыми и наклонными зубьями. Производительность станков, работающих конусными сторонами кругов, выше, чем станков с тарельчатыми кругами Наиболее высокую производительность имеют станки, работающие одновременно по обоим профилям зубьев на одном направлении обкатывания

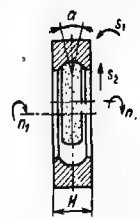
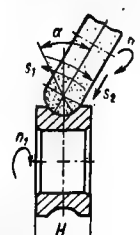
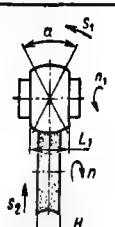
Продолжение табл. 2.9

Схема шлифования		Машинное время, мин	Применение
Абразивным червяком		$\frac{k_1 h}{s_1} + \frac{h(1+k_2)}{s_2}$, где h — длина хода суппорта с заготовками; k_1 — количество ходов при шлифовании; k_2 — количество ходов при выхаживании; s_1 — подача суппорта при шлифовании; s_2 — подача суппорта при выхаживании	Обработка цилиндрических зубчатых колес с прямыми и винтовыми зубьями и зуборезных долбяков. По сравнению с приведенными схемами обкатывания зубошлифование методом обкатывания червячным абразивным кругом выше по производительности в 4—5 раз

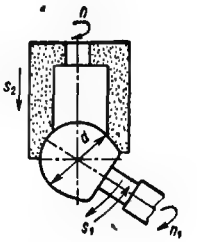
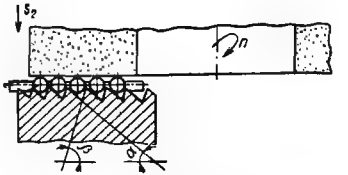
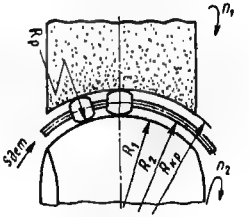
Таблица 2.10

Шлифование сферических поверхностей

Схема шлифования			Применение
Методом радиальной подачи периферией круга, в центрах (в патроне)	Многопроходное	Машинное время, мин $\left(\frac{\frac{\pi D}{2}\frac{\alpha}{180}}{s_1} + T_c\right)\left(\frac{kh}{s_2} + m_1\right)$	Обработка полусферических поверхностей любых размеров. В связи с невысокой производительностью, главным образом в *единичном* и *мелкосерийном* производстве

Схема шлифования			Применение
Методом радиальной подачи периферией круга, в центрах (в патроне)	Многопроходное		Обработка полусферических внутренних поверхностей наружных колец шарикоподшипников любых размеров. Профиль фасонной поверхности обеспечивается за счет кинематики процесса Обработка полусферической поверхности любого размера в патроне или в центрах
			
			

Продолжение табл. 2.10

Схема шлифования			Применение
Торцом круга методом осевой подачи в центрах (в патроне)	Многопроходное		Обработка части сферы в случаях обеспечения высокой точности и минимальной шероховатости обрабатываемой поверхности. Метод применяется как отделочный процесс
Методом осевой подачи торцом круга, бесцентровое			Черновая, получистовая и чистовая обработка шариков всех размеров для шарикоподшипников, обработка бочкообразных роликоподшипников. Процесс высокопроизводительный, его используют при получистовой и окончательной обработке
Методом осевой подачи периферией круга, бесцентровое	Однопроходное		

одним из трех способов, для каждого из которых используют соответствующего типа зубообрабатывающие станки:

а) шлифование профиля зуба двумя тарельчатыми кругами формы 3Т; шлифовальные круги получают вращательное и возвратно-поступательное движение вдоль образующей зуба, зубчатое колесо вращается вокруг своей оси в одном направлении и одновременно прямолинейно перемещается, так что колесо как бы катится по воображаемому контуру рейки; за один цикл окончательно шлифуют обе стороны одной впадины, после чего шлифовальные круги выводят из впадин, и зубчатое колесо осуществляет делительное движение на один зуб·

б) шлифование профиля зуба одним тарельчатым или специальным кругом формы 3Т, 2П; последовательно шлифуют обе стороны впадины между зубьями; правка кругов в обоих случаях производится автоматически;

в) шлифование профиля зубьев абразивным червяком. Движение деления является непрерывным и согласуется с обкаточным вращательным движением зубчатого колеса и поступательным движением витка абразивного червяка в осевом направлении.

При шлифовании косозубых колес методом обкатывания абразивные круги устанавливают так, чтобы плоскость их вращения располагалась касательно к направлению зубьев колеса, для чего ось вращения кругов поворачивают на угол наклона зубьев. Точность операции зубошлифования, выполненной по методу обкатывания, значительно выше, чем по методу копирования

Шлифование сферы (табл. 2.10) требует сложных движений механизмов станка и приспособления: выполняют его простыми по форме абразивными кругами, например формы Т. В качестве других наиболее характерных примеров получения фасонных поверхностей можно привести обработку наружных и внутренних поверхностей колец шарикоподшипников, шлифование неполной сферы фасонным кругом или кругом формы ЧЦ.

Шлифование шариков (табл. 2.10) выполняется при противоположном вращении ведущего барабана и шлифовального круга. В канавках ведущего барабана перекатываются шарики, опирающиеся на нож. Вследствие различных углов наклона α и β опорных поверхностей канавок ведущего барабана возникает дополнительное вращение шариков, которое обеспечивает получение правильной сферической формы

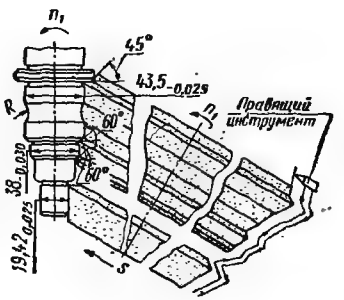
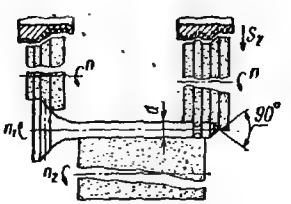
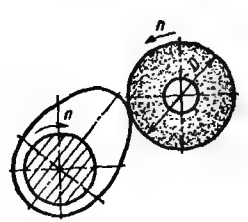
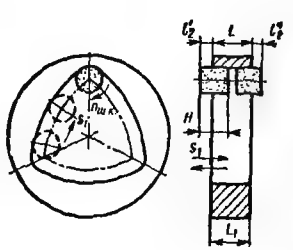
При бесцентровом шлифовании бочкообразных роликов последние передвигаются между вогнутым шлифовальным и выпуклым ведущим кругами по изогнутому опорному ножу. На входе и выходе роликов из зоны шлифования устанавливают фигурные направляющие.

Фасонные поверхности вращения обрабатывают шлифовальными кругами специального профиля, которые периодически правят (табл. 2.11). Для повышения производительности обработки, исходя из возможностей оборудования и технических требований к обрабатываемой поверхности, предусматривают максимальную ширину круга (кругов) для возможно более полного приближения профиля круга к окончательной форме детали. Правку кругов в зависимости от характеристики обрабатываемого материала детали, шлифовального круга и снимаемого припуска производят по копиру через 5—40 деталей. Ось шлифовального круга составляет с осью вращения обрабатываемой детали, как правило, угол 30—60°. Для одно-, двух- и многокруговой наладок правку производят алмазным фасонным роликом после обработки 1—30 деталей Ось вращения правочного ролика, как правило, параллельна оси вращения шлифовального круга.

Шлифование фасонной поверхности тел вращения с образованием сложного профиля асимметричного центру вращения обрабатываемой детали (с переменным радиусом профиля), осуществляется за счет сложного относительного движения обрабатываемой детали по копиру, движения детали с переменной скоростью или перемещения оси шлифовального круга по шаблону.

Таблица 2.11

Обработка сложных фасонных поверхностей

	Схема шлифования		Применение
Методом радиальной подачи	С правкой по копиру		Шлифование поверхностей сложной конфигурации при одно- и многокруговой наладке
	С правкой врезанием алмазным роликом		Шлифование поверхностей сложной конфигурации при одно- и многокруговой наладке. Производительность процесса шлифования значительно возрастает за счет сокращения времени на правку шлифовального круга
	С перемещением изделия по копиру		Шлифование поверхностей сложного профиля типа кулачков. Процесс высокопроизводительный
	С перемещением шлифовального круга по шаблону		Производительность процесса ниже, чем в предыдущем случае

§ 2.2. Абразивные круги

Краткие сведения о технологии изготовления абразивных кругов

Абразивные круги изготовляют из зерен абразивных материалов на керамических и органических (синтетических) связках. Основное количество шлифовальных кругов выпускают из электрокорундовых материалов, второе место по объему производства занимают круги из карбида кремния зеленого или черного.

В СССР для изготовления кругов применяют шлифовальные зерна, шлифпорошки и микропорошки обычных абразивных материалов по ГОСТ 3647—71. В ряде случаев для повышения плотности и твердости кругов последние изготовляют из смеси зерен двух или трех номеров. Этим достигается более плотная укладка зерен при прессовании. Круги чрезвычайно твердые, например идущие для обработки тел качения шарикоподшипников, изготовляют из смеси зерен корундовых и карбидокремниевых материалов.

Связку абразивных кругов определяют назначением инструмента и условиями его эксплуатации. Наибольшее применение в производстве абразивных кругов получили неорганические керамические связки. Керамические связки представляют собой многокомпонентные смеси тонкодисперсных, измельченных материалов: огнеупорной глины, полевого шпата, перлита, талька, борных, бариевых или щелочных и щелочноземельных стекол и ряда других материалов. Применяют также однокомпонентные связки (фритованные — сплавленные из природных или искусственных материалов) или природные стекловидные — перлитовые, обсидиановые.

При изготовлении инструмента на керамических связках для повышения пластичности и формуемости абразивно-керамических масс применяют клеющие вещества: растворимое стекло, декстрин, сульфитный щелок. Из органических широко применяют бакелитовую и вулканитовую связки и значительно реже глифталевую, поливинилформалевую эпоксидную. Бакелит применяют в жидком и порошкообразном виде, пригодном для изготовления деталей холодным прессованием. Модифицированный рядом добавок бакелит используют для изготовления деталей горячим прессованием. Жидкий бакелит применяют как увлажнитель при изготовлении кругов на связке ПБ (порошкообразный бакелит), бакелит более высокой вязкости применяют как самостоятельную связку при изготовлении некоторых кругов. При изготовлении кругов на связке ПБ применяют наполнители: гипс, криолит, пирит, алюминиевый порошок и другие материалы.

В состав вулканитовой связки входят синтетические каучуки, вулканизирующие агенты, ускорители, наполнители, мягчители (сера, окись цинка, окись магния, каптакс, турмалин и т д.).

Изготовление кругов на керамических связках. Технологический процесс производства абразивных кругов на керамической связке состоит из следующих операций: приготовление формовочной массы, формование кругов, сушка, обжиг, механическая обработка, контроль, маркировка и складирование. Все материалы и абразивные зерна, связку, увлажнитель подвергают массовому или объемному дозированию в соответствии с заданной рецептурой и смешивают. Крупнозернистые массы смешивают в мешалках планетарного типа в течение 10—15 мин. Смешивание тонкозернистых масс — абразивных микропорошков и связки осуществляют в шаровых барабанах в течение 1—4 ч, затем в мешалках массу увлажняют Смешанную массу пропускают через вибрационное сито для удаления комков и посторонних примесей и загрязнений, укладывают в соответствующую тару и подают к прессам. Абразивные круги формуют на гидравлических или механических прессах различных усилий (до 2000 тс), причем дозирование массы, укладка и разравнивание ее в пресс-формах, как правило, механизированы.

Для обеспечения равномерной плотности и твердости круга и максимальной степени уравновешенности массу в пресс-форме тщательно разравнивают

ручными инструментами или при помощи разравнивающей машины. Круги прессуют до заданной высоты или до заданного давления. В целях компенсации недостаточно равномерной укладки массы в пресс-форму при формовании применяют гидравлические плиты. Извлечение отформованных кругов из пресс-форм осуществляется механическими или гидравлическими выталкивателями. Круги сушат в камерах или туннельных сушилках нагретым воздухом при температуре до 100° С от 2 до 72 ч, в зависимости от размеров и характеристики детали

Обжиг основного количества абразивных кругов производят в туннельных непрерывно действующих печах, отапливаемых природным газом или мазутом, при температуре 1230—1300° С в течение 42—96 ч. Время обжига в зависимости от размеров деталей составляет 10—30 ч. Обожженные круги диаметром 100 мм и более подвергают механической обработке. Обрабатывают плоскости кругов, посадочные отверстия, периферийную часть, а также профили фасонных кругов.

После обработки и обдувки круги проверяют на точность размеров и степень уравновешенности. Круги в соответствии со стандартом испытывают на механическую прочность вращения на специальных испытательных станках, а затем проверяют на твердость; крупнозернистые круги испытывают на пескоструйных приборах мод. 909 и 910 завода «Калибр», мелкозернистые — на твердомерах ТК-2. Испытанные круги маркируют и отправляют на склад или в упаковку.

Круги для скоростного шлифования (до 80 м/с) выпускают на абразивных заводах по соответствующим техническим условиям. Для изготовления скоростных кругов применяют специальные высокопрочные керамические связки, легированные окислами бора, лития и других металлов, стекловидные или тонкокристаллические — ситалловые. Механическую обработку кругов для скоростной обработки ведут в ряде случаев с применением алмазного инструмента (класс А, ГОСТ 2424—75). Уравновешенность кругов должна соответствовать первому классу по ГОСТ 3060—75; уменьшение неуравновешенности путем заливки свинца или импрегнирования в тело круга не допускается. Все круги испытывают на механическую прочность вращением на специальных испытательных станках у изготовителя и у потребителя перед установкой их на станок.

Изготовление кругов на органических связках. Дозирование компонентов масс в соответствии с рецептурой осуществляется массовым и объемным способами. Массы из жидкого высоковязкого бакелита смешивают в двухлопастных смесителях; массы с применением пульвербакелита — в планетарных или вертикально-шнековых смесительных машинах. Компоненты в мешалку загружают в следующей последовательности: абразивное зерно, увлажнитель—бакелит вязкостью 5—30, пульвербакелит и наполнитель (алебастр, криолит или пирит).

Массу смешивают в течение 7—12 мин, затем ее протирают через сетку на протирочной машине, укладывают в тару и подают к гидравлическим или механическим прессам. Дозирование и укладку массы в пресс-форму осуществляют взвешиванием и разравниванием массы вручную или механически.

Круги прессуют при давлении 200—500 кгс/см^2 на прессах и формовочных агрегатах различных типов. Круги для скоростных и силовых обдирочных операций прессуют в формах, нагреваемых до 140—180° С, с выдержкой около 1 ч. Часть отрезных кругов на жидком бакелите изготовляют методом раскатки на специальных роликовых станках. Резьбошлифовальные круги на высоковязком жидком бакелите изготовляют прокаткой на вальцах.

Формованные круги выталкивают из пресс-формы, укладывают на металлические плиты и устанавливают в этажерки на поддоны или вагонетки, которые загружают для термической обработки в камерные или туннельные бакелизаторы. Часто круги, формованные горячим прессованием, подвергают дополнительной бакелизации: в зависимости от размеров, твердости и зернистости их бакелизируют по заданному режиму в течение 7—16 ч при нагреве до 200° С.

Изготовление кругов на вулканитовой связке. Процесс производства кругов начинают с изготовления связки, в состав которой входят синтетический каучук, сера, окись цинка, окись магния, каптакс, тиурам. Связку изготовляют на смесительном оборудовании — вальцах или мешалках. Сначала расплавляют каучук, затем последовательно вводят взвешенные компоненты. Готовая связка сре-

зается с вальцев и из нее приготовляют абразивную массу Зерно и связку смешивают в заданных соотношениях после чего массу прокатывают на прокатных вальцах для получения пласта толщиной в 1,5—2 раза больше чем высота формуемого круга. Затем пласты на калибровочных вальцах прокатывают до заданной высоты круга. Из полученных пластов специальными штампами на прессах вырубают круги. Круги высотой более 16—20 мм изготовляют из нескольких пластов

Круги сложного профиля с регулируемой пористостью изготовляют из порошкообразных масс, которые приготовляют в рыхлительных машинах. Массу засыпают в пресс-форму, разравнивают и прессуют на гидравлическом прессе. Заформованные круги пересыпают тальком, укладывают между металлическими плитами, которые скрепляют и устанавливают на этажерки печных вагонеток. Термическую обработку кругов ведут в камерных или туннельных вулканизаторах при температуре 160—170° С. После термической обработки круги подвергают механической обработке. Обработанные круги испытывают на механическую прочность вращением, определяют их твердость и маркируют

Характеристика абразивных кругов

Производительность процесса шлифования, качество обработанных поверхностей, стойкость инструмента, себестоимость операции во многом зависят от того, насколько правильно и обоснованно выбрана характеристика круга. В характеристику абразивного круга (в широком понимании этого термина) входят все параметры, определяющие строение, состав, свойства, геометрическую форму. размеры, точность их исполнения и уравновешенность инструмента.

Типаж абразивных кругов, головок и сегментов. Абразивные круги (головки, сегменты) изготовляют самых различных форм и размеров, выбор которых обусловлен конфигурацией и размерами обрабатываемой детали, требованиями к результатам обработки, характером технологической операции, типом и размером оборудования. Типаж шлифовального инструмента общего назначения регламентирован государственными стандартами. Кроме этого, существуют отраслевые стандарты и нормали, согласно которым выпускают определенную номенклатуру инструмента специального назначения. К последним относятся инструмент прецизионный и повышенной точности, круги, выпускаемые для нужд какой-либо определенной отрасли промышленности или отдельного предприятия массового производства, а также круги новых для отечественной практики форм и размеров.

В табл. 2.12 приведен типаж абразивных кругов, изготовляемых в соответствии с ГОСТ 2424—75.

Абразивные круги изготовляют из различных марок электрокорунда и карбида кремния на керамической (К), бакелитовой (Б), вулканитовой (В) и специальных связках. Кроме форм кругов, приведенных в табл. 2.12, имеются и другие формы, предусмотренные отраслевыми стандартами и нормалями. По ОН 2 036-24-69 значительную номенклатуру инструмента составляют круги типов УП (угловые плоские) и ФП (фасонные плоские). Круги типов УП1—УП14 предназначены для круглого врезного шлифования, когда оси круга и детали непараллельны. Рабочие профили этих кругов весьма разнообразны и определяются соответствующими профилями шлифуемых деталей. Круги УП изготовляют на связке К с диапазоном размеров $D = 400 \div 974$; $H = 15 \div 125$ и $d = 127 \div 305$ мм.

Круги типов ФП1—ФП10 предназначены для фасонного врезного шлифования деталей; их изготовляют на связке К с диапазоном размеров $D = 335 \div 750$ мм $H = 19 \div 55$ мм и $d = 127 \div 305$ мм.

По отраслевому стандарту ОСТ 2-12—71 выпускают типаж кругов (П1—П4) из электрокорунда и карбида кремния на связках К и В для шлифования прецизионных подшипников на станках высокой и особо высокой точности. Эти круги используют в комплектах для профильного врезного шлифования; диапазон их размеров $D = 600 \div 900$ мм, $H = 38 \div 153$ мм и $d = 305$ мм

Для современных высокопроизводительных (скоростного и силового) методов шлифования, которые находят все более широкое применение в машиностроении, необходимо использовать высокопрочные абразивные круги. Разработаны

Таблица 2.12

Типаж абразивных кругов

Вид круга	Тип	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
Прямого профиля	ПП		$D = 3 \div 1060$ $H = 1 \div 250$ $d = 1 \div 305$
С двусторонним коническим профилем	2П		$D = 250 \div 500$ $H = 8 \div 32$ $d = 76 \div 203$ $\alpha = 40 \div 60°$
С коническим профилем	3П		$D = 80 \div 500$ $H = 6 \div 50$ $d = 20 \div 203$
С конической выточкой	ПВК		$D = 300 \div 750$ $H = 50 \div 80$ $d = 127 \div 305$ $D_1 = 200 \div 500$ $\alpha = 10 \div 20°$
С выточкой	ПВ		$D = 10 \div 600$ $H = 13 \div 100$ $d = 3 \div 305$ $D_1 = 5 \div 375$
С двусторонней выточкой	ПВД		$D = 100 \div 900$ $H = 25 \div 250$ $d = 32 \div 305$ $D_1 = 88 \div 375$

Вид круга	Тип	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
С двусторонней конической выточкой	ПВДК		$D = 750$ $H = 80$ $d = 305$ $D_1 = 500$
Специальные	ПН		$D = 450 \div 700$ $H = 40 \div 80$ $d = 51 \div 305$
	Q		$D = 150 \div 300$ $H = 8 \div 20$ $d = 32 \div 127$ $b = 5 \div 10$
	ПР		$D = 500 \div 1250$ $H = 16$ $d = 51 \div 250$
Кольцевые	К		$D = 200 \div 500$ $H = 80 \div 160$ $d = 76 \div 400$
Чашечные цилиндрические	ЧЦ		$D = 40 \div 300$ $H = 25 \div 100$ $d = 13 \div 150$ $D_1 = 32 \div 250$

Вид круга	Тип	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
Чашечные конические	ЧК		D = 80 ÷ 800 H = 25 ÷ 150 d = 13 ÷ 150 D_1 = 40 ÷ 230 α = 50 ÷ 80° β = 45 ÷ 80°
Тарельчатые	Т		D = 80 ÷ 350 H = 8 ÷ 40 d = 13 ÷ 127 b = 4 ÷ 13 H_1 = 2 ÷ 6

различные способы упрочнения инструментов: создание специальных связок, армирование кругов стеклосеткой, стальными кольцами и ряд других способов. Перспективными являются методы упрочнения кругов путем изменения их конструктивной формы. У кругов, показанных на рис. 2.1 *а* и *б*, сечения представляют собой соответственно балку равного сопротивления и трапецию. Расчеты показывают, что нормальные и касательные напряжения, возникающие

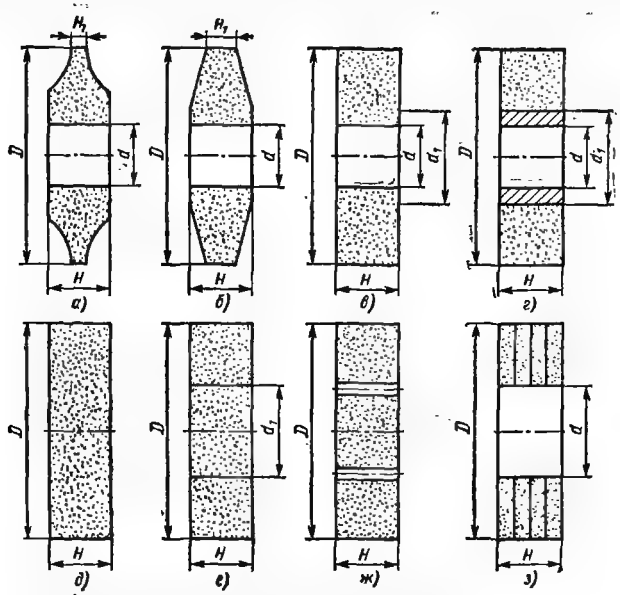
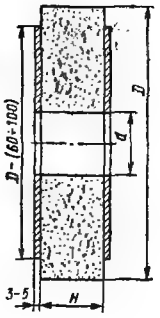


Рис. 2.1. Конструкции абразивных кругов, предназначенных для скоростного шлифования



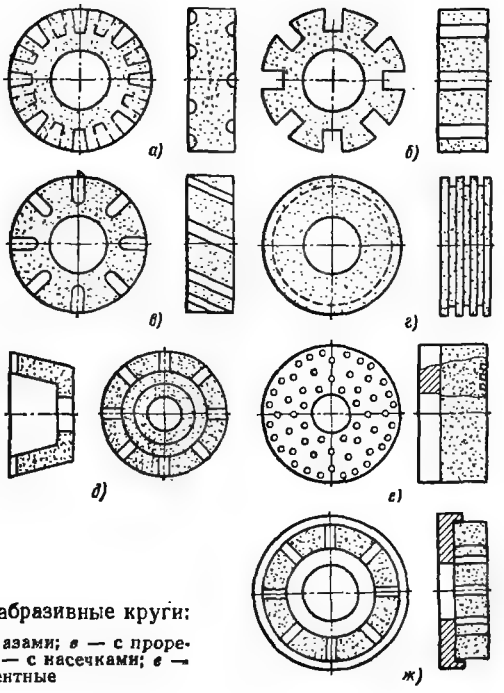


Рис. 2.2. Круг с упрочняющими торцовыми кольцами

Рис. 2.3. Прерывистые абразивные круги:

а — с выточками; *б* — с пазами; *в* — с прорезями; *г* — с канавками; *д* — с насечками; *е* — с отверстиями; *ж* — сегментные

в кругах подобной формы, значительно ниже, чем в кругах формы ПП. Однако изготовление и эксплуатация таких кругов представляют определенные затруднения, в связи с чем заслуживают внимания попытки упрочнить круги без изменения их формы. На рис. 2.1, *в* показан круг, у которого область, прилегающая к посадочному отверстию *d*, выполнена из более плотного и прочного абразивного материала, чем остальная его часть, поскольку именно эта область испытывает наибольшие напряжения. На рис. 2.1, *г* показан круг, у которого по этим же соображениям вклеена центральная металлическая втулка. Аналогичная конструкция круга, но с полимерной центральной втулкой разработана в Тольяттинском политехническом институте. Для изготовления центральной втулки опробован ряд полимерных материалов, а также компаундов. Наиболее приемлемым оказался следующий компаунд: смола ЭД-6—100 массовых частей (м. ч.), пластификатор дибутилфталат — 10 м. ч., отвердитель полиэтиленполиамин (ПЭПА) — 10 м. ч. и наполнитель кварцевый песок — 33 м. ч.

На рис. 2.1, *д—е* показаны круги формы ПП без посадочного отверстия. Круги этого типа на шпиндель шлифовального станка устанавливают с помощью стальной планшайбы, приклеиваемой к торцу круга. У круга типа 2.1, *е* вклеена центральная пробка, изготовленная из низкокачественного абразива. Круг, показанный на рис. 2.1, *ж*, имеет шесть-восемь малых крепежных отверстий, равномерно расположенных по окружности. Круг, представленный на рис. 2.1, *з*, армирован прокладками из стекловолокна или какого-либо другого материала, который подвергают интенсивному сжатию во время прессования инструмента. На рис. 2.2 показана конструкция круга, упрочнение которого осуществлено с помощью стальных колец, приклеенных к торцам.

Одним из методов повышения эффективности и улучшения качества абразивной обработки является применение кругов с прерывистой рабочей поверхностью. На рис. 2.3 показаны некоторые конструкции прерывистых абразивных кругов. В табл. 2.13 приведен типаж шлифовальных головок, форма которых регламен-

Таблица 2.13

Типаж абразивных шлифовальных головок

Вид головки	Тип	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
Цилиндрические	ГЦ		$D = 3 \div 40$ $H = 6 \div 60$ $d = 1 \div 13$ $h = 3 \div 32$
Угловые	ГУ		$D = 16 \div 40$ $H = 8 \div 10$ $d = 5 \div 6$ $h = 6$
Конические	ГК60°		$D = 10 \div 32$ $H = 25 \div 50$ $d = 3 \div 6$ $h = 15 \div 20$
Сводчатые	ГСв		$D = 6 \div 32$ $H = 10 \div 50$ $d = 2 \div 6$ $R = 12 \div 65$ $r = 1 \div 2$ $h = 6 \div 25$
Конические с закругленной вершиной	ГКЗ		$D = 8 \div 40$ $H = 16 \div 75$ $d = 3 \div 13$ $h = 6 \div 32$ $R = 2 \div 5$
Шаровые	ГШ		$D = 16 \div 100$ $d = 3 \div 6$ $h = 4 \div 13$
Шаровые с цилиндрической боковой поверхностью	ГШЦ		$D = 16 \div 25$ $H = 20 \div 60$ $d = 5 \div 6$ $h = 8 \div 25$ $R = 7{,}5 \div 12{,}5$

тируется ГОСТ 2447—64. Головки изготовляют из электрокорунда на керамической связке. Некоторые формы головок, отличные от представленных в табл. 2.13, делают по отраслевым стандартам и нормалям.

Для производства сегментных абразивных кругов применяют шлифовальные сегменты, типаж которых регламентирован ГОСТ 2464—67, а также отраслевыми стандартами и нормалями. Сегменты изготовляют из электрокорунда и карбида кремния на бакелитовой связке. В табл. 2.14 приведен типаж сегментов (L обозначена длина сегмента).

Абразивные материалы. Для изготовления абразивных кругов применяют электрокорунд нормальный, белый, хромистый, титанистый и циркониевый, монокорунд, сферокорунд, карбид кремния зеленый и черный. Свойства этих материалов, а также их условные обозначения приведены в § 1.1 настоящего справочника. Зерновой состав кругов регламентирован ГОСТ 3647—71.

Твердость абразивных кругов. Степень твердости абразивного круга характеризует прочность удержания зерна в теле круга. Она практически не зависит от твердости абразивного зерна. Чем легче абразивное зерно выкрашивается из инструмента, тем он мягче, и наоборот. Показателем твердости абразивного инструмента является глубина лунки на поверхности круга (при использовании пескоструйного метода измерения твердости по ГОСТ 18118—72) или показания шкалы прибора Роквелла (при использовании метода вдавливания шарика по ГОСТ 19202—73). Первый метод определения твердости применяют для инструмента на всех видах связок, зернистостью 50 и менее и при высоте круга 8 мм и более, второй — на керамической и бакелитовой связках, зернистостью 12 мм и менее и при высоте круга не более 8 мм. Твердость кругов на вулканитовой связке определяют в соответствии с ГОСТ 21323—75. В табл. 2.15, 2.16 и 2.17 приведены условные обозначения и показатели твердости абразивных кругов.

Структура абразивных кругов. Этот параметр характеризует объемное содержание абразивных зерен в инструменте в процентах; его обозначают номерами. Закрытая структура (№ 1, 2, 3, 4) относится к плотным кругам и соответствует 60, 58, 56 и 54% абразивных зерен в объеме инструмента; средняя структура (№ 5, 6, 7, 8) соответствует объемному содержанию зерен 52, 50, 48 и 46%: открытая структура (№ 9, 10, 11, 12) соответствует объемному содержанию зерен 44, 42, 40 и 38%.

Существенное влияние на шлифующие свойства абразивного инструмента оказывает его пористость. Основное количество кругов изготовляют с объемной пористостью 30—45%. Только круги специального назначения, например для шлифования шарикоподшипников, изготовляют с минимальной пористостью.

Связка абразивного инструмента. Вид связки абразивного инструмента существенно влияет на его прочность и режим работы. В табл. 2.18 приведены виды связок и их обозначение. В табл. 2.19 приведены физико-механические свойства для некоторых абразивных кругов. Коэффициенты теплопроводности, определенные на образцах, и температуропроводности усреднены для интервала температур 20—600° С. Для повышения теплопроводности кругов на органической связке в их массу при изготовлении вводят в качестве наполнителя тонкодисперсные порошки меди или алюминия. Добавка алюминиевого порошка при прочих равных условиях повышает теплопроводность круга (табл. 2.20), что способствует снижению температуры на контактной поверхности шлифуемой детали.

Величина модуля упругости зависит от количества и качества абразивного зерна и связки. Установлено, что круги на керамических связках одинаковой твердости с меньшим значением модуля упругости обладают лучшими режущими свойствами и кромкостойкостью. Круги, изготовленные из одних и тех же материалов, с одинаковыми характеристиками, но с относительно большей ударной вязкостью, имеют более высокую стойкость.

Значения предела прочности абразивных кругов на изгиб и на разрыв увеличиваются с повышением твердости и уменьшением зернистости. Круги из карбида кремния, изготовляемые на спекающихся связках, имеют предел прочности ниже, чем круги из электрокорундовых материалов, изготовленные на связках, плавящихся в процессе обжига. Круги, имеющие прочность на разрыв в пределах 100—135 кгс/см^2, используют для шлифования со скоростью до 35 м/с. В последние годы разработаны новые керамические связки, обеспечивающие прочность

Таблица 2.14

Типаж шлифовальных сегментов

Сегмент	Тип	Эскиз сечения	Предельные размеры мм
Плоский	СП		$B = 45 \div 150$ $H = 20 \div 50$ $L = 60 \div 250$
Выпукло-вогнутый	1С		$B = 55 \div 150$ $B_1 = 40 \div 110$ $R = 85 \div 300$ $R_1 = 60 \div 250$ $L = 75 \div 200$
Вогнуто-выпуклый	2С		$B = 80 \div 95$ $B_1 = 75 \div 80$ $R = 170 \div 250$ $R_1 = 150 \div 220$ $L = 125 \div 175$
Выпукло-плоский	3С		$B = 110 \div 380$ $B_1 = 75 \div 210$ $H = 40 \div 240$ $R = 200 \div 500$ $L = 150 \div 300$
Плоско-выпуклый	4С		$B = 100 \div 190$ $B_1 = 80 \div 180$ $H = 40 \div 50$ $R = 220 \div 400$ $L = 150$
Трапециевидный	5С		$B = 60 \div 100$ $B_1 = 46 \div 85$ $H = 16 \div 40$ $L = 125 \div 150$
Специальный	6С		$B = 85$ $H = 78$ $R = 18$ $L = 50$

Сегмент	Тип	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
Специальный	7С		$B = 175$ $R = 400$ $R_1 = 350$ $b = 25$ $L = 175$
	8С		$B = 75 \div 95$ $B_1 = 25 \div 38$ $H = 50 \div 70$ $R = 145$ $L = 90 \div 110$
	9С		$B = 70$ $B_1 = 68$ $B_2 = 86$ $H = 150$ $H_1 = 30$ $L = 374$
	10С		$D = 140$ $D_1 = 135$ $H = 75$
	11С		$B = 33$ $B_1 = 28$ $H = 20$ $H_1 = 5$ $H_2 = 4$ $L = 122$

Таблица 2.15

Условные обозначения и показатель твердости абразивных кругов, определяемые пескоструйным методом и при давлении воздуха в камере $p = 1,5$ кгс/см²

Твердость круга	Обозначение степени твердости	Глубина лунки (мм) при зернистости						
		50	От 40 до 32	От 25 до 16	От 12 до 8	От 6 до М40	От М28 до М20	М14 и менее
Мягкий	М3	—	—	—	—	—	—	От 5,00 до 4,60
Среднемягкий	СМ1	—	—	—	—	—	От 5,05 до 4,55	Менее 4,60 до 4,20
	СМ2	От 4,00 до 3,40	От 4,90 до 4,20	От 5,60 до 4,90	От 5,30 до 4,60	От 5,10 до 4,60	Менее 4,55 до 4,10	Менее 4,20 до 3,80
Средний	С1	Менее 3,40 до 2,85	Менее 4,20 до 3,60	Менее 4,90 до 4,30	Менее 4,80 до 4,30	Менее 4,60 до 4,10	Менее 4,10 до 3,60	Менее 3,80 до 3,40
	С2	Менее 2,85 до 2,35	Менее 3,60 до 3,05	Менее 4,30 до 3,70	Менее 4,30 до 3,90	Менее 4,10 до 3,60	Менее 3,60 до 3,20	Менее 3,40 до 3,10
Среднетвердый	СТ1	Менее 2,35 до 2,00	Менее 3,05 до 2,55	Менее 3,70 до 3,15	Менее 3,90 до 3,50	Менее 3,60 до 3,10	Менее 3,20 до 2,90	Менее 3,10 до 2,80
	СТ2	Менее 2,00 до 1,70	Менее 2,55 до 2,20	Менее 3,15 до 2,75	Менее 3,50 до 3,10	Менее 3,10 до 2,80	Менее 2,90 до 2,60	Менее 2,80 до 2,50
	СТ3	Менее 1,70 до 1,45	Менее 2,20 до 1,90	Менее 2,75 до 2,35	Менее 3,10 до 2,80	Менее 2,80 до 2,50	Менее 2,60 до 2,30	Менее 2,50 до 2,20
Твердый	Т1	Менее 1,45 до 1,25	Менее 1,90 до 1,60	Менее 2,35 до 2,10	Менее 2,80 до 2,50	Менее 2,50 до 2,20	Менее 2,30 до 2,05	Менее 2,20 до 2,80
	Т2	Менее 1,25 до 1,10	Менее 1,60 до 1,45	Менее 2,10 до 1,85	Менее 2,50 до 2,20	Менее 2,20 до 2,05	Менее 2,05 до 1,90	Менее 2,00 до 1,80

Продолжение табл. 2.15

Твердость круга	Обозначение степени твердости	Глубина лунки (мм) при зернистости						
		50	От 40 до 32	От 25 до 16	От 12 до 8	От 6 до М40	От М28 до М20	М14 и менее
Весьма твердый	ВТ	Менее 1,10 до 0,90	Менее 1,45 до 1,20	Менее 1,85 до 1,60	—	—	—	—
Чрезвычайно твердый	ЧТ	Менее 0,90 до 0,75	Менее 1,20 до 1,10	Менее 1,60 до 1,40	—	—	—	—

Таблица 2.16

Условные обозначения и показатель твердости абразивных кругов, определенные при пескоструйном методе и давлении воздуха $p = 0{,}5$ кгс/см²

Степень твердости круга	Обозначение степени твердости	Глубина лунки (мм) при зернистости					
		50	От 40 до 16	От 12 до 8	От 6 до М40	От М28 до М20	М14 и менее
Мягкий	М1	От 4,30 до 3,40	От 5,60 до 4,60	От 6,10 до 5,55	От 6,10 до 5,20	От 4,65 до 4,05	От 2,60 до 2,20
	М2	Менее 3,40 до 2,40	Менее 4,60 до 3,40	Менее 5,55 до 4,85	Менее 5,20 до 4,30	Менее 4,65 до 3,45	Менее 2,20 до 1,80
	М3	Менее 2,40 до 1,55	Менее 3,40 до 2,30	Менее 4,85 до 4,15	Менее 4,30 до 3,70	Менее 3,45 до 2,85	—
Среднемягкий	СМ1	Менее 1,55 до 1,00	Менее 2,30 до 1,45	Менее 4,15 до 3,35	Менее 3,70 до 3,10	—	—

Таблица 2.17

Условные обозначения и показатель твердости абразивных кругов, определенные по методу Роквелла (шкала В)

Степень твердости круга	Обозначение степени твердости	Показатель твердости при зернистости		
		От 12 до 8	От 6 до 5	От 4 и менее
Мягкий	М1	От —6 до 6	От 2 до 10	От 19 до 27
	М2	Св. 6 до 27	Св. 10 до 19	Св. 27 до 36
	М3	Св. 27 до 37	Св. 19 до 27	Св. 36 до 45
Среднемягкий	СМ1 СМ2	От 4 до 13 Св. 13 до 24	Св. 27 до 36 Св. 36 до 45	Св. 45 до 55 Св. 55 до 65
Средний	С1 С2	Св. 24 до 35 Св. 35 до 44	Св. 45 до 55 Св. 55 до 65	Св. 65 до 73 Св. 73 до 81
Среднетвердый	СТ1 СТ2 СТ3	Св. 44 до 54 Св. 54 до 63 Св. 63 до 72	Св. 65 до 73 Св. 73 до 82 Св. 82 до 89	Св. 81 до 87 Св. 87 до 96 Св. 96 до 102
Твердый	Т1 Т2	Св. 72 до 80 Св. 80 до 88	Св. 89 до 96 Св. 96 до 102	Св. 102 до 106 Св. 106 до 110

Примечание. Этот метод применяют при высоте круга не более 8 мм.

Таблица 2.18

Обозначение связок

Вид связки	Условное обозначение	Разновидность связки	Краткая характеристика связки
Керамическая	К	К0 К1 К3 К7 К8 К5	—
Бакелитовая	Б	Б Б1 Б2 Б3 БУ	Пульвербакелит с криолитом Пульвербакелит с другими наполнителями Бакелит жидкий Специальная Для кругов, армированных стеклосеткой
Вулканитовая	В	В В1, В2, В3	Натрийбутадиеновая, изготовляемая на вальцах Специальная Для инструментов, изготовляемых прессованием
Глифталевая	ГФ	ГФ	—
Поливинилформалевая	ПФ	ПФ	—

Таблица 2.19

Физико-механические свойства абразивных кругов

Абразивный материал	Зернистость	Твердость	Теплопроводность, $\times 10^3$ кал/(см·с·град)	Температуропроводность $\times 10^5$, см²/с	Модуль упругости $\times 10^{-4}$, кгс/см²	Предел прочности на сжатие, кгс/см²	Предел прочности при растяжении, кгс/см²	Ударная вязкость, кгс·см/см²	Газопроницаемость, л·см/(ч·см²·мм вод. ст.)
Электрокорунд	40	СМ2	0,44	0,70	30,0	254	157	1,50	0,47
		С2	0,47	0,74	32,5	316	195	1,80	0,44
		СТ1	0,50	0,75	60,6	374	206	2,04	0,36
		СТ2	0,50	0,72	64,0	340	193	2,20	0,30
		Т2	0,52	0,76	73,0	270	—	2,56	—
	16	М3	0,35	0,55	40,5	344	186	1,85	0,21
		СМ2	0,39	0,62	41,5	420	221	2,50	0,18
	4	СМ2	0,32	0,53	47,4	378	178	2,05	—
		С2	0,34	0,55	57,4	364	—	2,15	—
		СТ2	0,36	0,55	73,0	565	—	2,37	—
		Т2	0,37	0,60	71,3	650	—	2,83	—
Зеленый карбид кремния	40	М3	0,94	1,62	37,5	163	65	0,80	0,49
		СМ2	1,08	1,87	41,7	181	83	0,88	0,41
		С2	1,15	1,99	48,7	213	95	0,96	0,37
		СТ2	1,21	1,98	53,5	240	112	1,00	0,24
	12	М3	0,88	1,52	45,5	221	100	1,52	—
		СМ2	0,95	1,65	56,9	335	158	2,02	0,066
		С2	1,07	1,80	70,8	346	180	2,06	0,060

на разрыв в пределах 220—260 кгс/см² и позволяющие изготовлять круги зернистостью 16—40, твердостью М2—СМ2, пригодные для работы со скоростью 60—80 м/с.

Коэффициент газопроницаемости круга существенно возрастает с увеличением номера зернистости и снижается с уменьшением номера структуры и увеличением содержания в абразивном круге количества связки. В кругах из электрокорундовых материалов газопроницаемость заметно возрастает с повышением температуры обжига. В кругах из карбида кремния с повышением температуры обжига газопроницаемость увеличивается только до определенного значения, а затем резко снижается.

Таблица 2.20

Изменение теплопроводности кругов на органической связке при добавке алюминиевого порошка

Добавка алюминиевого порошка к массе связки, %	Относительная теплопроводность при 50° С	Относительная теплопроводность при 200° С	Добавка алюминиевого порошка к массе связки, %	Относительная теплопроводность при 50° С	Относительная теплопроводность при 200° С
0	1,0	1,0	30	2,3	3,3
10	1,9	2,5	50	3,2	4,0

Для определения коэффициента газопроницаемости можно использовать аппаратуру и образцы по ГОСТ 11573—65. Существуют негостированные приборы, позволяющие в течение нескольких секунд определить величину газопроницаемости. По относительной величине газопроницаемости можно определить степень однородности строения отдельно взятого круга, а также партии кругов.

Средняя плотность абразивных инструментов зависит от их структуры. Круги на связках К и Б зернистостью 80—16, твердостью М3—Т2 имеют среднюю плотность от 2,0 до 2,6 кг/см^3. Средняя плотность кругов на связке В составляет 2,6—3 г/см^3.

Технические требования к абразивным кругам. Технические требования к абразивным инструментам состоят из собственно технических требований, методов испытаний, а также требований к маркировке, упаковке, хранению к транспортированию инструмента. Собственно технические требования содержат пункты, определяющие зерновой состав абразивных материалов, точность исполнения основных и вспомогательных размеров, условия, допускающие отклонения от норм точности, допускаемые погрешности геометрической формы инструментов, требования к их внешнему виду, балансировке и прочности, условия подачи рекламаций потребителем и замены абразивного инструмента предприятием-поставщиком.

Абразивные круги общего назначения изготовляют трех классов: АА, А и Б. В табл. 2.21 приведены предельные отклонения для наружного диаметра, в табл. 2.22 предельные отклонения высоты, а в табл. 2.23 и 2.24 предельные отклонения диаметра посадочного отверстия кругов.

В табл. 2.25 приведены нормы точности размеров абразивных сегментов (нормы относятся ко всем размерам сегмента).

По ГОСТ 2424—75 для абразивных кругов установлены точности на непараллельность, выпуклость и вогнутость торцовых поверхностей (табл. 2.26), овальность и конусообразность наружных поверхностей (табл. 2.27 и 2.28), а также смещение оси отверстия от номинального положения (табл. 2.29).

Следует отметить, что нормы точности на размеры кругов *D* и *H* по ТУ 2-036-201—73 взяты из общегосударственных стандартов «Допуски и посадки». Подобным же образом нормируют точность исполнения размеров алмазных кругов (см. § 2.3). Многие зарубежные фирмы также используют общегосударственные или национальные системы допусков и посадок для нормирования точности размеров абразивных инструментов, не создавая для этих целей специальных норм. Технико-экономические преимущества подобного решения очевидны.

Правила приемки. Контроль соответствия кругов требованиям ГОСТ 2424—75 предприятие-изготовитель проводит путем приемочных и периодических испытаний. При этом в зависимости от наружного диаметра круга установлен объем выборки от 0,5 до 15% от партии кругов (но не менее 10 шт.), которая должна состоять из кругов одного типоразмера и одной характеристики, одновременно предъявляемых по одному документу. Испытания кругов проводят периодически не реже одного раза в год; результаты испытаний оформляют в виде протоколов.

Методы испытаний. ГОСТ 2424—75 предусматривает контроль твердости, размеров и повреждений, неуравновешенности кругов, а также испытание их на механическую прочность (ГОСТ 12.2.001—74).

Маркировка, упаковка, транспортирование и хранение. На торцовой поверхности круга диаметром 250 мм и более наносят товарный знак предприятия-изготовителя, условное обозначение круга и номер маршрутного листа. На кругах диаметром свыше 40 до 250 мм маркируют товарный знак предприятия-изготовителя, марку шлифовального материала, зернистость, марку связки (кроме кругов диаметром от 40 до 60 мм), степень твердости и класс точности. Для кругов диаметром менее 40 мм маркировку наносят на коробку или пакет с кругами. ГОСТ 2424—75 допускает класс неуравновешенности круга наносить на обратной его стороне, а маркировку на кругах типов ЧК, ЧЦ, К — на периферии инструмента.

При использовании смеси шлифовальных материалов либо комбинаций из разных зернистостей на круге маркируют основную марку или зернистость.

Круги диаметром до 40 мм необходимо упаковывать в коробки или пакеты. Последние упаковывают в ящики (ГОСТ 2991—69) или в бочки (ГОСТ 5958—70).

Таблица 2.21

Предельные отклонения наружного диаметра круга (мм)

Номинальный наружный диаметр круга D	Класс точности			Номинальный наружный диаметр круга D	Класс точности		
	АА	А	Б		АА	А	Б
До 6	±0,3	±0,3	±0,5	Св. 180 до 260	±1,5	±2,0	±3,5
Св. 6 до 30	±0,5	±0,7	±1,0	» 260 » 500	±2,0	±3,0	±5,0
» 30 » 50	±0,8	±1,0	±1,5	» 500 » 800	±2,5	±4,0	±6,5
» 50 » 80	±1,0	±1,2	±2,0	» 800	±3,0	±5,0	±8,0
» 80 » 180	±1,2	±1,5	±2,5				

Таблица 2.22

Предельные отклонения высоты круга (мм)

Номинальная высота H	Класс точности			Номинальная высота H	Класс точности		
	АА	А	Б		АА	А	Б
До 3	±0,10	±0,2	±0,3	Св. 16 до 40	±0,20	±1,0	±1,5
Св. 3 до 6	±0,15	±0,3	±0,5	» 40 » 100	±0,25	±1,2	±2,0
Св. 6 » 10	±0,20	±0,5	±0,7	» 100	±0,30	±1,5	±3,0
» 10 » 16	±0,20	±0,7	±1,0				

Таблица 2.23

Предельные отклонения диаметра посадочного отверстия (кроме кругов ПН, ПР и К) [мм]

Номинальный диаметр посадочного отверстия d	Класс точности			Номинальный диаметр посадочного отверстия d	Класс точности		
	АА	А	Б		АА	А	Б
До 10	+0,1	+0,1	+0,2	Св. 80 до 120	+0,2	+0,2	+0,5
Св. 10 до 18	+0,1	+0,1	+0,3	» 120 » 180	+0,2	+0,3	+0,5
» 18 » 50	+0,1	+0,2	+0,3	» 180 » 260	+0,2	+0,3	+0,6
» 50 » 80	+0,2	+0,2	+0,4	» 260	+0,3	+0,4	+0,7

Таблица 2.24

Предельные отклонения диаметра посадочного отверстия кругов типов ПН, ПР и К (мм)

Номинальный диаметр посадочного отверстия d	Класс точности		
	АА	А	Б
Св 51 до 120	+1,0	+1,5	+2,0
» 120 » 260	+1,5	+2,0	+3,0
» 260	+2,0	+3,0	+4,0

Таблица 2.25

Предельные отклонения размеров абразивных сегментов (мм)

Номинальный размер, мм	Класс точности круга	
	А	Б
Св. 16 до 25	+1,0	+1,0 −0,5
» 25 » 40	+1,0	±1,0
» 40 » 65	+1,5	+1,5 −1,0
» 65 » 100	+2,0	±2,0
» 100 » 160	+2,0	±2,0
» 160	+3,0	±3,0

Таблица 2.26

Непараллельность, выпуклость и вогнутость торцовых поверхностей круга (мм)

Номинальный наружный диаметр	Класс точности		
	АА	А	Б
До 160	0,10	0,15	0,25
Св. 160 до 400	0,15	0,25	0,40
» 400	0,20	0,40	0,50

Примечание. Для кругов типов ПН и ПР указанные погрешности формы не должны превышать 0,6 мм для класса АА, 0,8 мм для класса А и 1,0 мм для класса Б.

Таблица 2.27

Овальность наружной поверхности (мм)

Номинальный наружный диаметр D	Класс точности		
	АА	А	Б
До 18	0,1	0,3	0,6
Св. 18 до 120		0,5	1,0
Св. 120 до 500	0,2	0,8	1,5
Св. 500		1,2	2,0

Таблица 2.28

Конусообразность наружной поверхности (мм)

Номинальная высота H	Класс точности		
	АА	А	Б
До 40	0,2	0,3	0,5
Св. 40 до 100	0,3	0,6	1,0
» 100	0,5	1,0	2,0

Таблица 2.29

Смещение оси отверстия (мм) от номинального положения (кроме кругов ПН и ПР)

Номинальный диаметр D	Класс точности		
	АА	А	Б
До 18	0,10	0,15	0,20
Св. 18 до 120	0,15	0,20	0,30
» 120 » 260	0,20	0,30	0,50
» 260	0,25	0,40	0,50

Аналогично упаковывают и круги диаметром свыше 40 мм. Круги диаметром свыше 250 мм можно транспортировать без упаковки, но в условиях, исключающих их повреждение. Круги типов ПП, ПВ, ПВД, ПВК, ПВДК и К диаметром до 100 мм необходимо хранить в ящике или коробке стопкой высотой не более 600 мм, а диаметром свыше 100 мм — на ребре или стопкой высотой не более 1000 мм.

Круги типов 2П и 3П, а также ПН и ПР необходимо хранить стопкой высотой не более 600 мм; последние, кроме того, можно хранить и на ребре. Круги типов ЧЦ, ЧК и С диаметром до 200 мм следует хранить стопкой высотой не более 600 мм, а диаметром свыше 200 мм — не более 1000 мм. Круги типа Т следует хранить стопкой высотой не более 300 мм.

Балансировка абразивных кругов. В соответствии с ГОСТ 2424—75 для абразивных кругов диаметром 250 мм и более должен быть проведен контроль неуравновешенности по ГОСТ 3060—75.

Уравновешенность является одним из основных комплексных показателей качества абразивных кругов. При шлифовании возникают автоколебания, вызываемые неуравновешенностью шпинделя, электродвигателя, ременной передачи и других частей шлифовального станка. Однако наибольшие колебания обусловлены неуравновешенностью шлифовального круга, которая приводит к вибрациям системы СПИД, возрастанию напряжений в круге, ухудшению качества шлифованных поверхностей и появлению на них прижогов, повышенному износу круга и увеличению расхода правящих средств, преждевременному выходу из строя шпиндельного и других узлов станка. Исключительно важное значение имеет степень уравновешенности кругов в связи со все более широким внедрением в практику скоростного и сверхскоростного шлифования.

Таблица 2.30

Допустимые неуравновешенные массы (г) кругов

Масса круга, кг	Класс неуравновешенности				Масса круга, кг	Класс неуравновешенности			
	1	2	3	4		1	2	3	4
От 0,20 до 0,25	2,5	4,0	6,0	12,0	Св. 8,00 до 10,0	15,0	25,0	40,0	75,0
Св. 0,25 до 0,30	2,5	4,5	7,0	14,0	Св. 10,00 до 12,50	17,0	27,0	45,0	85,0
Св. 0,30 до 0,40	3,0	5,0	7,5	15,0	Св. 12,50 до 16,00	20,0	30,0	50,0	95,0
Св. 0,40 до 0,50	3,5	5,5	9,0	17,0	Св. 16,00 до 20,00	22,0	35,0	55,0	110,0
Св. 0,50 до 0,63	4,0	6,0	10,0	20,0	Св. 20,00 до 25,00	25,0	40,0	60,0	120,0
Св. 0,63 до 0,80	4,5	7,0	11,0	22,0	Св. 25,00 до 30,00	27,0	45,0	65,0	135,0
Св. 0,80 до 1,00	5,0	7,5	12,0	25,0	Св. 30,00 до 40,00	30,0	50,0	75,0	150,0
Св. 1,00 до 1,25	5,5	9,0	14,0	27,0	Св. 40,00 до 50,00	35,0	55,0	85,0	170,0
Св. 1,25 до 1,60	6,0	10,0	15,0	30,0	Св. 50,00 до 63,00	40,0	60,0	95,0	190,0
Св. 1,60 до 2,00	7,0	11,0	17,0	35,0	Св. 63,00 до 80,00	45,0	65,0	110,0	215,0
Св. 2,00 до 2,50	7,5	12,0	20,0	40,0	Св. 80,00 до 100,00	50,0	75,0	120,0	240,0
Св. 2,50 до 3,00	9,0	14,0	22,0	45,0	Св. 100,00 до 125,00	55,0	85,0	135,0	270,0
Св. 3,00 до 4,00	10,0	15,0	25,0	50,0	Св. 125,00 до 160,00	60,0	95,0	150,0	300,0
Св. 4,00 до 5,00	11,0	17,0	27,0	55,0	Св. 160,00 до 200,00	70,0	110,0	170,0	340,0
Св. 5,00 до 6,30	12,0	20,0	30,0	60,0	Св. 200,00 до 250,00	75,0	120,0	190,0	380,0
Св. 6,30 до 8,00	14,0	22,0	35,0	70,0	Св. 250,00 до 300,00	85,0	130,0	210,0	420,0

Дисбалансом называют произведение неуравновешенной массы G на ее эксцентриситет S относительно оси вращения. Согласно ГОСТ 3060—75 установлены четыре класса неуравновешенности шлифовальных кругов, а допустимые неуравновешенные массы определены в зависимости от массы кругов, изготовляемых на керамической, бакелитовой, вулканитовой и специальных органических связках. В табл. 2.30 даны допустимые неуравновешенные массы абразивных кругов. Для кругов точности АА класс неуравновешенности должен быть первым, для кругов точности А — первым или вторым и для кругов точности Б — вторым или третьим.

Основные причины, вызывающие появление неуравновешенности у шлифовальных кругов: 1) погрешность геометрической формы круга; 2) эксцентричность посадочного отверстия круга относительно его наружной поверхности; 3) неравномерность (неравноплотность) структуры круга; 4) смещение центра круга относительно оси его вращения вследствие зазора, образующегося между посадочным отверстием круга и планшайбой (оправкой, патроном); 5) неравномерное поглощение кругом влаги, пыли, отходов шлифования; 6) износ круга в процессе шлифования.

Теоретические расчеты и практика показывают, что наибольшее влияние на неуравновешенность кругов оказывают четыре первые причины.

Неуравновешенность круга может быть измерена и рассчитана. Расчет позволяет установить и проанализировать зависимость неуравновешенности от отдельных причин, вызывающих ее появление. Возможны два подхода: 1) нахождение частных зависимостей неуравновешенности от отдельных факторов с последующим векторным или скалярным суммированием результатов расчета; 2) вывод обобщенной зависимости, учитывающей единовременное действие всех рассматриваемых источников неуравновешенности.

В табл. 2.31 представлены расчетные схемы и формулы, позволяющие определять значения частных неуравновешенных масс $Б_c$, $Б_e$, $Б_H$ до и после первой правки круга, установленного на шпиндель шлифовального станка.

Из сравнения формул (2.3) и (2.4) видно, что величина $Б_c$ после правки снижается в $\left[\left(\frac{D}{d}\right)^2 - 1\right]$ раз. Дисбаланс $Б_e$ после первой правки круга становится равным нулю. Это достигается снятием с круга слоя абразива, равного $2e$. Следовательно, чем больше e, тем большее время затрачивают на правку и тем больше будет расход абразивного и правящего инструментов.

Формулы (2.6) и (2.7) позволяют рассчитать величину $Б_H$. Правкой инструмента невозможно устранить неуравновешенную массу $Б_H$, хотя по мере съема абразива эта величина будет уменьшаться. Если при правке круга снимают слой абразива с размером ΔD на сторону, то после правки значение $Б_H$ определяют выражением (2.7), где $\Delta H_1 = \Delta H \left(1 - \frac{\Delta D}{D}\right)$; $D_1 = D - 2\Delta D$.

На величину неуравновешенности круга $Б_\gamma$, являющейся результатом его неравноплотности, существенное влияние оказывают погрешности технологического процесса изготовления кругов и, в частности, непараллельность плоскости нижней плиты пресс-формы и верхней плоскости формуемой массы после разравнивания, перекос осей пресс-формы и пуансона, а также неравномерное распределение зерна и связки после перемешивания.

Расчеты показывают, что значения $Б_\gamma$ для кругов класса А увеличиваются от 3,05 до 167,7 г, а для кругов класса Б от 3,27 до 196,2 г. Эти данные относятся к формованию кругов без применения гидроплит. Использование гидроплит приводит к существенному уменьшению значений $Б_\gamma$. Однако усовершенствование технологии изготовления кругов не может полностью устранить их неравноплотность.

Суммарную неуравновешенность круга определяют векторной суммой

$$\bar{Б} = \bar{Б}_e + \bar{Б}_c + \bar{Б}_H + \bar{Б}_\gamma + \bar{Б}_0, \qquad (2.8)$$

где $\bar{Б}_0$ — неуравновешенная масса, определяемая прочими причинами.

Рассчитать величину $\bar{Б}$ по формуле (2.8) можно, если известно взаимное расположение векторов. В противном случае следует принимать во внимание худший вариант и определять наибольшее значение суммы.

При выводе обобщенной формулы для расчета величины неуравновешенной массы следует иметь в виду, что статистический анализ данных (ГОСТ 2424—75) показывает, что отношение $\psi = \frac{D}{H}$ увеличивается в пределах 2,0—66,5, составляя в среднем $\psi = 16{,}3$. При $\psi \geqslant 5$ [51] абразивные круги формы ПП можно считать дисками, и тогда при расчете неуравновешенной массы необходимо учитывать смещение центра тяжести только в радиальном направлении. В этом случае величина неуравновешенной массы круга может быть определена по формуле

$$Б = \frac{V\gamma}{R}\, y, \qquad (2.9)$$

где V — объем шлифовального круга; y — смещение центра тяжести.

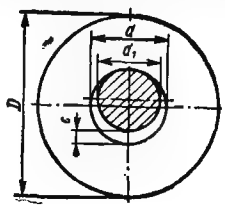
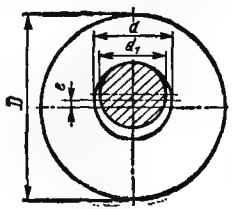
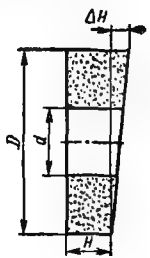
С учетом значений V и y, полученных интегрированием, последующих преобразований и упрощений при опускании членов, содержащих малые второго и третьего порядков, имеем формулу

$$Б = 98 \cdot 10^{-6} \frac{V}{D^2} \{(D^2 - d^2)\,[(D^2 + d^2)\,\Delta H + 8DHc] + 16D^3He\}\, K_1K_2, \qquad (2.10)$$

где значения D, d, H, ΔH, c, e даны в мм; γ — в г/см^3, $Б$ — в г.

Таблица 2.31

Зависимость неуравновешенности шлифовального круга от погрешностей его установки и геометрической формы

Неуравновешенные массы (г), вызванные		
зазором между посадочным диаметром круга и планшайбой	эксцентриситетом посадочного диаметра круга относительно наружного	непараллельностью торца круга
		
До правки круга		
$Б_c = 785 \cdot 10^{-6} \dfrac{(D^2 - d^2)\,H\gamma c}{D}$ (2.3)	$Б_e = 157 \cdot 10^{-6}\, DH\gamma e$ (2.5)	$Б_H = 196 \cdot 10^{-6} \dfrac{D^4 - d^4}{D^2} \dfrac{H\gamma\,\Delta H}{2H + \Delta H}$ (2.6)
После правки круга		
$Б_c = 785 \cdot 10^{-6} \dfrac{d^2 H\gamma c}{D}$ (2.4)	$Б_e = 0$	$Б_H = 196 \cdot 10^{-6} \dfrac{D^4 - d^4}{D^2} \dfrac{H\gamma\,\Delta H_1}{2H + \Delta H_1}$ (2.7)

Примечание. γ — плотность абразива, г/см³; c — диаметральный зазор между посадочными поверхностями круга и планшайбы, мм; e — эксцентриситет посадочной поверхности круга относительно наружной поверхности, мм; ΔH — непараллельность торцов круга, мм.

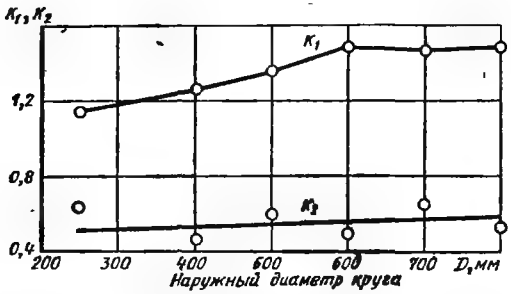


Рис. 2.4. Зависимость поправочных коэффициентов K_1 и K_2 от наружного диаметра круга

С помощью расчетно-экспериментального метода найдены поправочные коэффициенты K_1 и K_2 (рис. 2.4) к формуле (2.10), учитывающие соответственно неравноплотность структуры круга и взаимное расположение векторов $\bar{e}$ и $\Delta\bar{H}$. Сравнение расчетных и экспериментальных значений $Б$ показывает сходимость в пределах ±5%. ГОСТ 3060—75 установлены величины допустимых погрешностей измерения неуравновешенных масс кругов (табл. 2.32).

Статической балансировке вне шлифовального станка подвергают новые круги перед установкой на шпиндель, а также инструменты, достигшие определенной величины износа. Число повторных балансировок круга можно найти по формуле

$$n = \frac{M_и}{M_д}\left[\frac{1-\left(\frac{D_1}{D}\right)^2}{1-\left(\frac{d}{D}\right)^2}\right] \qquad (2.11)$$

где $M_и$, $M_д$ — соответственно исходный и допускаемый дисбаланс круга; D_1 — диаметр изношенного круга.

Пример. Исследованиями [71] установлена связь температуры шлифования θ шероховатости обработки Ra, минутного съема Q с дисбалансом (рис. 2.5) при круглом наружном шлифовании закаленной стали 40ХГНМ кругом ПП 300×40×127 24А25СМ16К5 на станке 3В12. Необходимо подсчитать число повторных правок круга, если исходный дисбаланс $M_и$ = 4350 г·см; средняя высота микронеровностей обработанных поверхностей Ra не должна превышать 1 мкм; температура, возникающая в зоне шлифования, не должна приводить к структурным превращениям поверхностных слоев детали; допускаемый износ круга равен 50 мм на сторону, т. е. D_1 = 200 мм.

Температура, соответствующая началу структурных превращений для стали 40ХГНМ, равна 840—860° С.

Таблица 2.32

Допустимые погрешности измерения неуравновешенности (г)

Масса круга, кг	Класс неуравновешенности				Масса круга, кг	Класс неуравновешенности			
	1	2	3	4		1	2	3	4
От 0,20 до 0,25	0,5	0,8	1,2	2,4	Св. 8,00 до 10,00	3,0	5,0	8,0	15,0
Св. 0,25 » 0,30	0,5	0,9	1,4	2,8	» 10,00 » 12,50	3,5	5,5	9,0	17,0
» 0,30 » 0,40	0,6	1,0	1,5	3,0	» 12,50 » 16,00	4,0	6,0	10,0	19,0
» 0,40 » 0,50	0,7	1,1	1,8	3,5	» 16,00 » 20,00	4,5	7,0	11,0	22,0
» 0,50 » 0,63	0,8	1,2	2,0	4,0	» 20,00 » 25,00	5,0	8,0	12,0	24,0
» 0,63 » 0,80	0,9	1,4	2,2	4,5	» 25,00 » 30,00	5,5	9,0	13,0	27,0
» 0,80 » 1,00	1,0	1,5	2,4	5,0	» 30,00 » 40,00	6,0	10,0	15,0	30,0
» 1,00 » 1,25	1,1	1,8	2,8	5,5	» 40,00 » 50,00	7,0	11,0	17,0	34,0
» 1,25 » 1,60	1,2	2,0	3,0	6,0	» 50,00 » 63,00	8,0	12,0	19,0	38,0
» 1,60 » 2,00	1,4	2,2	3,5	7,0	» 63,00 » 80,00	9,0	13,0	22,0	43,0
» 2,00 » 2,50	1,5	2,4	4,0	8,0	» 80,00 » 100,00	10,0	14,0	24,0	48,0
» 2,50 » 3,00	1,8	2,8	4,5	9,0	» 100,00 » 125,00	11,0	17,0	27,0	54,0
» 3,00 » 4,00	2,0	3,0	5,0	10,0	» 125,00 » 160,00	12,0	19,0	30,0	60,0
» 4,00 » 5,00	2,2	3,5	5,5	11,0	» 160,00 » 200,00	14,0	22,0	34,0	68,0
» 5,00 » 6,30	2,4	4,0	6,0	12,0	» 200,00 » 250,00	15,0	24,0	38,0	76,0
» 6,30 » 8,00	2,8	4,5	7,0	14,0	» 250,00 » 300,00	17,0	26,0	42,0	84,0

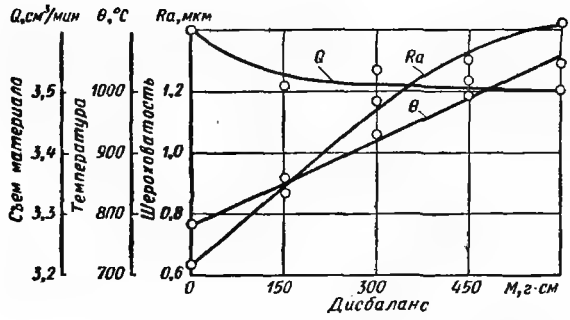
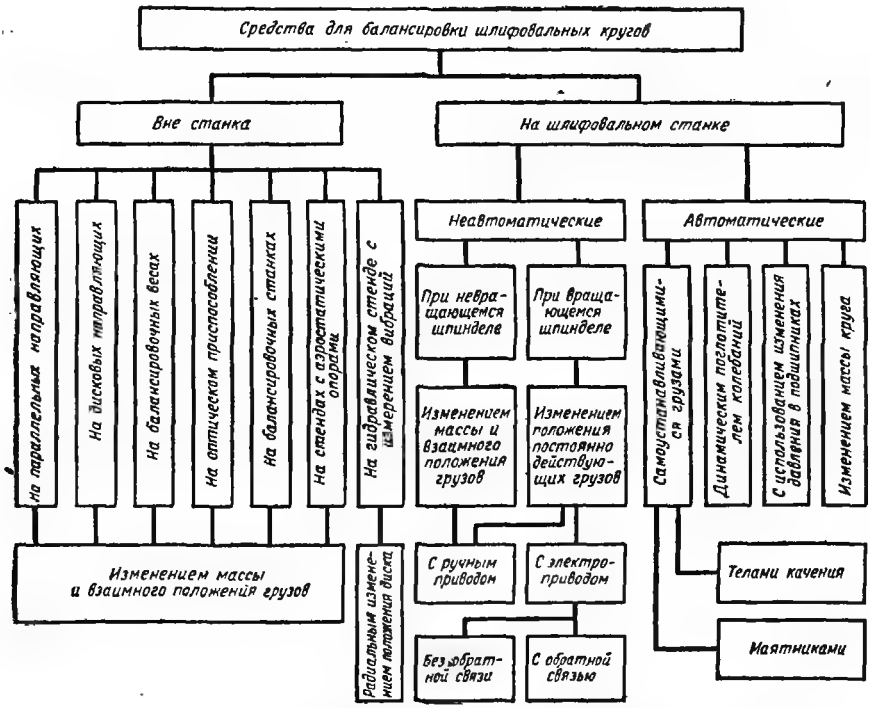


Рис. 2.5. Зависимость показателей процесса шлифования от дисбаланса абразивного круга:

$v_{кр}$ = 38 м/с; $v_{н}$ = 38 м/мин; t = 0,01 мм/ход; $s_{пр}$ = = 1,4 м/мин

Рис. 2.6. Классификация средств, применяемых для балансировки шлифовальных кругов



Определяем допустимый дисбаланс для θ = 850° С, составляющий $M_д$ = 1500 г·мм (рис. 2.5). Величина Ra при этой неуравновешенности равна 0,9 мкм, а минутный съем материала Q = 3,52 см³/мин. По формуле (2.11) определяем величину

$$n = \frac{4350}{1500} = \left[\frac{1 - \left(\frac{200}{300}\right)^2}{1 - \left(\frac{127}{300}\right)^2}\right] \approx 2.$$

Классификация средств, применяемых для балансировки шлифовальных кругов, приведена на рис. 2.6.

Устройства для балансировки кругов вне шлифовального станка. Абразивные круги наиболее часто балансируют на станках с параллельными направляющими. Станки просты по устройству и эксплуатации и бывают с направляющими,

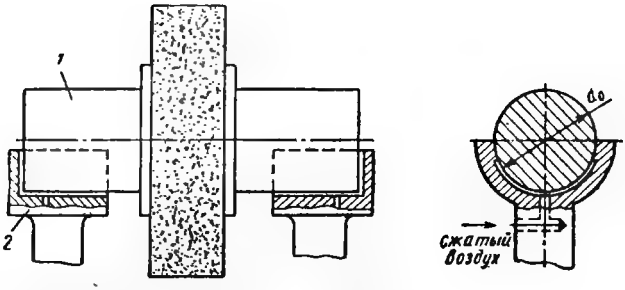


Рис. 2.7. Схема балансировочного станка с аэростатическими опорами

выполненными в виде цилиндрических валиков, а также плоских ножей и призм. Круг отдельно или вместе с планшайбой устанавливают на специальную оправку, имеющую коническую посадочную и цилиндрические опорные шейки, и закрепляют с помощью фланца и гайки. К числу основных недостатков указанных станков следует отнести низкую точность и малую производительность измерения дисбаланса и балансировки кругов.

Станки с дисковыми направляющими также часто используют в практике балансировки шлифовальных кругов. Они просты в эксплуатации и не требуют высокой точности взаимной выверки дисков. Основной их недостаток — невысокие точность и производительность балансировки.

Балансировочные весы позволяют получить более высокую точность уравновешивания по сравнению с параллельными и дисковыми станками. Однако они более сложны в эксплуатации и пригодны для балансировки кругов диаметром до 600 мм.

Оптические балансировочные станки [115] обеспечивают сравнительно высокую производительность балансировки шлифовальных кругов и дают возможность измерять дисбаланс у необожженных кругов, что представляет интерес для абразивных производств. К числу недостатков этих станков следует отнести ограничение диаметра (до 350 мм) и массы (до 7 кг) балансируемых кругов и сложность тарирования.

Для балансировки шлифовальных кругов можно применять балансировочные станки общего назначения типов 9В725, 9710, ДБ-3, ДБ-4, ДБ-5, ДБ-10, ДБ-50, ДБ-102, МС-22, МВТУ-703, МВТУ-704 и др., а также специальные балансировочные станки [104]. Указанные станки позволяют производить статическую и динамическую балансировку шлифовальных кругов с высокой точностью и производительностью. В каждом конкретном случае следует экономически обосновывать целесообразность использования балансировочных станков той или иной модели.

Станки с аэростатическими опорами [12] позволяют измерять величину неуравновешенной массы и балансировать круги с весьма высокой точностью. На рис. 2.7 показана схема станка с аэростатическими опорами, который разработан в Тольяттинском политехническом институте и предназначен для балансировки кругов диаметром до 1200 мм. Балансировочную оправку *1*, на которую насаживают круг, устанавливают на опоры *2*. Сжатый воздух под давлением $p = 2 \div 4$ кгс/см^2 подводят к опорам, и оправка с кругом всплывает на воздушной подвеске. Отсутствие контакта между рабочими поверхностями оправки и опор обеспечивает сведение момента трения к минимуму. Диаметр опоры d_0 подсчитывают [78] следующим образом:

$$d_0 = \frac{GK}{2(L-l)(p_0-p_a)},$$

где G — масса комплекта (круга, оправки, планшайбы), кг; K — коэффициент, учитывающий конструкцию опоры (для данного случая $K = 1{,}6$); L и l — кон-

структивные размеры опоры, см; p_0 и p_a — соответственно давление поддува и атмосферное давление, кгс/см².

Погрешность измерения неуравновешенной массы $\Delta Б$, выраженную величиной неуравновешенного груза, приведенного к наружному диаметру круга D, можно вычислить по формуле

$$\Delta Б = 31{,}4 \cdot 10^{-3} \frac{\mu v L d_0^2}{Dh}, \qquad (2.12)$$

где μ — динамическая вязкость воздуха (при $p_a = 1$ кгс/см² и температуре 20° С $\mu = 1{,}84 \cdot 10^{-6}$ кгс·с/м²); v — частота вращения оправки, мм/с.

В результате опытно-промышленной проверки балансировочных станков с аэростатическими опорами установлено, что точность балансировки абразивных кругов $D = 300 \div 800$ мм по сравнению с точностью их балансировки на станке с цилиндрическими направляющими (по ГОСТ 3060—75 этот стенд предписывается как основное балансировочное средство) повышается не менее чем в 10 раз.

Хорошо зарекомендовал себя гидравлический стенд для балансировки кругов с бесступенчатым регулированием частоты вращения и с активным контролем вибрации опор [118].

Балансировочные приспособления, предназначенные для балансировки кругов непосредственно на шлифовальных станках при невращающемся и вращающемся шпинделях. Устройства с ручным перемещением компенсирующих грузов при невращающемся шпинделе, часто базирующиеся на применении амплитудно-фазового метода балансирования, не нашли пока широкого применения. Системы с ручным регулированием компенсирующих грузов при вращающемся шпинделе отличаются невысокой эксплуатационной надежностью и большой конструктивной сложностью, в связи с чем находят пока ограниченное практическое применение.

Известен ряд схем и конструкций балансировочных систем с механизированным управлением перемещением компенсирующих грузов. Перспективной является конструкция балансировочной системы, в которой дистанционное управление процессом уравновешивания осуществляется с помощью электромагнита и муфт, приводимых в действие соответствующим переключением тумблеров [27]. Значительный интерес представляет собой балансировочное устройство мод. БМ20 с волновым редуктором [89]. Движение механизму перемещения компенсирующего груза сообщается непосредственно от вращающегося шпинделя станка, а медленные перемещения осуществляются при помощи двухволнового редуктора с большим передаточным отношением. Технологическая возможность устройства составляет 6000 г·мм, и при этом балансировка шлифовального круга диаметром 400 мм производится в течение 1,5—2 мин с точностью до 0,5 мкм. Балансировочные устройства с механизированным управлением перемещения грузов отличаются высокими производительностью и точностью балансировки и более предпочтительны по сравнению с устройствами с ручным регулированием компенсирующих грузов.

В системах для автоматической балансировки кругов на шлифовальных станках в качестве компенсирующих грузов используют шары, ролики, маятники и другие тела. Применяют также системы, в которых уравновешивание кругов производят путем удаления части абразива, а также гидравлическим методом. Автоматические системы балансировки кругов на шлифовальных станках наиболее перспективны с точки зрения как производительности, так и точности балансировки.

При балансировке шлифовальных кругов, входящих в многокруговые наладки имеются некоторые особенности. Уравновешенность всей системы обеспечивается при сборке многокругового комплекта на запасном шпинделе станка смещением заранее установленной тяжелой части каждого круга относительно предыдущего на угол $360/m$ градусов (m — число кругов в наладке). Уравновешенность каждого круга наладки не должна выходить за пределы 1-го класса по ГОСТ 3060—75.

Для компенсации неуравновешенности шлифовальных кругов в настоящее время применяют метод заливки свинца в подготовленную секторную канавку, которую выдалбливают на торце круга у посадочного отверстия. Этот метод явля-

ется, однако, несовершенным как по технологии, так и по эффективности балансировки. Перспективным способом компенсации неуравновешенности абразивных кругов является метод инъекции аэрозолей [38], пригодный главным образом для инструмента на керамической связке, а также для крупнозернистых кругов на бакелитовой связке. Инъекция аэрозолей обеспечивает накопление компенсирующей массы в большом объеме шлифовального круга, что создает условия для достаточно длительного сохранения уравновешенности круга в процессе его эксплуатации.

Рекомендации по выбору абразивных кругов. Многообразие сочетаний физико-механических свойств и структуры материалов, а также условий шлифования не позволяет однозначно устанавливать оптимальную характеристику шлифовального круга и его абразивного материала. Ниже приводятся лишь общие рекомендации, основанные на практике. Для обработки материалов с высоким сопротивлением разрыву (стали, ковкого чугуна, железа, бронзы) используют круги из электрокорундовых материалов. При грубой обработке — обдирке стальных отливок, поковок, проката, высокопрочных и отбеленных чугунов, ковкого чугуна, получистовой и чистовой обработке различных деталей машин из углеродистых и легированных сталей в незакаленном и закаленном виде, марганцовистой бронзы, никелевых и алюминиевых сплавов рекомендуется применение кругов из нормального электрокорунда.

Для тяжелых обдирочных операций при обработке легированных сталей изготовляют обдирочные инструменты из крупных (125—80) высокопрочных, специально обработанных зерен нормального электрокорунда, циркониевого электрокорунда или цилиндрических зерен корунда. Обработку деталей из этих материалов на получистовых и чистовых операциях, а также шлифование и заточку инструментов рекомендуется вести кругами из электрокорунда повышенного качества.

Абразивный инструмент из белого и хромистого электрокорунда применяют при обработке закаленных деталей из углеродистых, быстрорежущих, нержавеющих сталей; хромированных и нитрированных поверхностей; при обработке тонких деталей и инструментов, когда отвод тепла, возникающего при шлифовании, затруднен (штампов, зубьев шестерен, резьбового инструмента, тонких ножей и лезвий, резцов, сверл, деревообрабатывающих ножей и т. п.); при обработке деталей (плоским, внутренним и профильным шлифованием) с большой площадью контакта между кругом и обрабатываемой поверхностью.

Для шлифования деталей из цементованных, закаленных, азотированных и высоколегированных сталей с низкой теплопроводностью и теплоемкостью применяют абразивные инструменты из монокорунда. Благодаря скалыванию в процессе шлифования мельчайших участков зерен монокорундовые круги обладают высокой режущей способностью. В результате сохранения остроты режущих кромок зерен снижаются потребляемая мощность и нагрев обрабатываемых деталей. Преимущества абразивного инструмента из монокорунда проявляются в большей степени на операциях получистового и чистового шлифования, при заточке режущих инструментов, шлифовании тонких и длинных резьб, зубо- и шлицешлифовании, шлифовании колец подшипников.

Для обработки твердых высокохрупких материалов с низким сопротивлением разрыву (чугуна, бронзовых и латунных отливок, твердых сплавов, драгоценных камней, стекла, мрамора, гранита, фарфора), мягких и вязких материалов (латуни, меди, алюминия), а также кремния, германия применяют абразивные круги из карбида кремния. Некоторые рекомендации по выбору зернистости кругов, основанные на практике шлифования, приведены ниже.

При ручных обдирочных операциях (зачистке заготовок, отливок, канавок, штампованных деталей) выбирают зернистость 125—80. При плоском шлифовании торцом круга, заточке средних и крупных резцов, правке инструмента, отрезке зернистость должна быть 80—50. При предварительном и комбинированном шлифовании (без съема детали со станка), заточке режущего инструмента зернистость должна соответствовать 40—25, при чистовом шлифовании, обработке профильных поверхностей, заточке мелкого инструмента, шлифовании хрупких материалов необходимо выбирать зернистость 25—16. При отделочном шлифовании, доводке твердых сплавов и заточке тонких режущих кромок зернистость целесо-

образно выбирать в пределах 12—6. При отделочном шлифовании металлов, стекла, мрамора, резьбошлифовании, доводке тонких режущих кромок зернистость должна соответствовать 6—4, а при шлифовании резьб с мелким шагом, доводке тонких режущих кромок и измерительных поверхностей калибров — М40 и мельче.

Связка абразивного инструмента не участвует в резании и удалении припуска, но она существенно влияет на состояние рабочей поверхности инструмента и работу абразивных зерен. В зависимости от вида обработки рекомендуются следующие связки абразивных инструментов: а) керамическая для всех видов шлифования, кроме обдирки на подвесных стенках, разрезки и прорезки узких пазов плоского шлифования сегментными кругами; б) бакелитовая для плоского шлифования торцом круга, обдирочных работ, выполняемых вручную и на подвесных стенках, отрезки и прорезки пазов, заточки инструмента, отделочного шлифования цилиндров, кулачков, роликов мелкозернистыми абразивными инструментами, хонингования и резьбошлифования; в) вулканитовая для отрезки, прорезки и шлифования пазов, обработки сферических поверхностей, чистовых операций при других видах фасонного шлифования, бесцентрового шлифования (ведущие круги), отделочного шлифования и полирования гибкими кругами, обработки тонких режущих кромок инструментов и других деталей, где опасен прижог; г) глифталевая с графитовым наполнителем для окончательного полирования.

Твердость абразивных инструментов в значительной степени определяет производительность процесса обработки и качество обработанной детали. При выборе твердости круга необходимо руководствоваться следующими основными положениями: 1) при обработке твердых материалов абразивные зерна быстрее истираются и затупляются; удаление затупившихся зерен легче происходит в сравнительно мягких кругах, поэтому для обработки твердых материалов следует применять мягкие и среднемягкие абразивные инструменты, а для обработки материалов невысокой твердости более твердые; исключение составляют медь, алюминий, свинец, нержавеющая и жаропрочная сталь, которые обрабатывают мягким инструментом; 2) с увеличением площади контакта между кругом и деталью давление на единицу площади круга уменьшается и, следовательно, обновление круга затрудняется; в этом случае следует применять более мягкий инструмент; 3) с повышением окружной скорости круга при прочих постоянных условиях следует уменьшать твердость применяемого инструмента; при интенсификации процесса шлифования за счет повышения скорости обрабатываемой детали или поперечной подачи применяют более твердые круги; 4) для предварительных операций шлифования применяют более твердые круги, чем для чистовых операций; 5) при шлифовании без охлаждения следует использовать менее твердые круги, чем при работе с охлаждением; 6) при шлифовании неровных, прерывистых поверхностей необходимо применять более твердые инструменты, чем при шлифовании ровных поверхностей; 7) на автоматических станках с повышенной жесткостью и спокойным ходом шпинделя применяют более мягкие круги, чем на станках с ручной подачей; 8) мелкозернистый инструмент должен иметь относительно меньшую твердость, чем крупнозернистый; 9) при заточке режущих кромок закаленного инструмента, при шлифовании и заточке пластинок из твердых сплавов, при обработке тонких деталей и деталей, плохо отводящих тепло, применяют мягкие шлифовальные круги; 10) при одинаковых условиях шлифования абразивный инструмент на бакелитовой связке должен быть на две степени тверже инструмента на керамической связке; 11) мягкие круги в среднем экономичнее твердых, так как их реже правят и при их использовании можно вести обработку с более интенсивными режимами, однако твердость их не должна быть столь низкой, при которой круги быстро изнашиваются и теряют форму; 12) для правки абразивного инструмента, обработки деталей часовых механизмов, шлифования шариков шарикоподшипников применяют наиболее твердые абразивные круги.

Рекомендации по выбору структуры абразивных кругов в зависимости от вида технологических операций приведены ниже.

При отрезке, профильном шлифовании с сохранением профиля круга, шлифовании при больших и переменных нагрузках рекомендуется применять абразивные круги со структурой № 3—4, при круглом наружном и бесцентровом

шлифовании, плоском шлифовании периферией круга — структуру № 5—6, при плоском шлифовании торцом круга и внутреннем шлифовании — структуру 7—9, при шлифовании и заточке инструмента — структуру № 8—10 и резьбошлифовании мелкозернистыми кругами — структуру № 8—12.

§ 2.3. Алмазные, эльборовые и кубонитовые круги

Алмазные, эльборовые и кубонитовые круги широко используют в машиностроении. Их применяют для круглого наружного и внутреннего, плоского, фасонного, бесцентрового шлифования деталей, заточки и доводки лезвийного режущего инструмента, резки и обработки неметаллических материалов. Алмазными кругами эффективно обрабатывать твердые сплавы, труднообрабатываемые стали, чугуны, цветные металлы и сплавы, керамику, ферриты, ситаллы, фарфор, кремний, германий, стекло, пластмассы, бетон и железобетон, кварц, мрамор, гранит, туф, известняк и другие материалы, применяющиеся в различных отраслях промышленности. Эльборовые и кубонитовые круги успешно используют при шлифовании высоколегированных конструкционных, инструментальных, быстрорежущих, нержавеющих и жаропрочных сталей, а также труднообрабатываемых сплавов.

Характеристика алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов

Производительность, качество обработки и эффективность процесса алмазного, эльборового и кубонитового шлифования находятся в непосредственной зависимости от того, насколько обоснованно выбрана характеристика шлифовального круга, которая включает параметры инструмента, определяющего его строение, состав, свойства, форму, размеры и точность исполнения.

Типаж алмазных и эльборовых кругов и головок. Алмазные шлифовальные круги изготовляют по ГОСТ 16167—70—16180—70, алмазные отрезные круги по ГОСТ 10110—71, алмазные отрезные сегментные круги по ГОСТ 16115—16116—70, алмазные шлифовальные головки по ГОСТ 17116—71—ГОСТ 17121—71, эльборовые шлифовальные круги по ГОСТ 17123—71, а также ОСТ 2.036—3—70 и ОСТ 2.036—6—70.

В соответствии с этими стандартами круги и головки, помимо буквенного обозначения их формы (АПП, АЧК, АГЦ и т. д.), имеют еще и шифрованное цифровое обозначение каждого типоразмера инструмента. Алмазные и эльборовые круги всех форм и размеров (кроме А1ПП и Л1ПП) состоят из корпуса, который изготовляют из стали, алюминиевого сплава или керамики и алмазоносного (эльборосного) слоя, содержащего зерна алмазного (эльборового) порошка, связку и в ряде случаев наполнитель. Алмазные шлифовальные головки состоят из рабочей части, покрытой алмазоносным слоем, и хвостовика. Алмазные круги изготовляют на органической, металлической и керамической связках, эльборовые — на органической и керамической связках.

Алмазные шлифовальные круги всех форм, кроме А1Т, изготовляют с концентрацией 150, 100, 75 и 50% (форма А1Т — с концентрацией 150, 100 и 75%), отрезные круги — с концентрацией 100, 50 и 25%, сегментные отрезные круги — с концентрацией 100, 75, 50 и 25%, головки — с концентрацией 100 и 50%, эльборовые круги — с концентрацией 150, 100, 50 и 25%.

В табл. 2.33 приведен типаж алмазных и эльборовых кругов и алмазных головок. Для специальных целей применяют алмазные и эльборовые круги, не представленные в табл. 2.33 (круги с внутренним резом; для обработки оптического стекла, кварца и других материалов; трубчатые; эластичные для изготовления микрошлифов; дисковые сегментные пилы; чашечные круги специальных форм).

Рядом эксплуатационных преимуществ обладают алмазные круги с прерывистой рабочей поверхностью. Применение прерывистых алмазных кругов приводит к снижению температуры в зоне резания, улучшению качества обработки, увеличению эффективности шлифования. На рис. 2.8, *а*, *б* показаны прерывистые алмазные круги форм АПП и АЧК.

Таблица 2.33

Типаж алмазных и эльборовых кругов и головок

Вид круга, головки	Тип	Обозначение	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
Плоские прямого профиля	АПП	2720-0000 2720-0167		$D=16 \div 500$ $b=3 \div 305$ $H=3 \div 50$ $s=2 \div 5$
	ЛПП (исполнение 1)	2720-0251 2720-0344		
	ЛПП (исполнение 2)	2720-0345 2720-0370		
Плоские прямого профиля без корпуса	А1ПП	2720-0180 2720-0187		$D=3 \div 17$ $H=1 \div 25$ $d=1 \div 6$
	Л1ПП	2720-0371 2720-0403		
Плоские прямого профиля трехсторонние	А2ПП	2720-0201 2720-0223		$D=125 \div 250$ $d=32 \div 127$ $b=4 \div 12$ $H=7 \div 20$ $H_1=6 \div 20$ $s=2 \div 4$
Плоские с выточкой	АПВ	2723-0001 2723-0116		$D=80 \div 300$ $d=20 \div 127$ $s=1,5 \div 5$ $H=18,5 \div 32$ $b=3 \div 60$
Плоские с двусторонней выточкой	АПВД	2723-0131 2723-0197		$D=100 \div 250$ $d=20 \div 127$ $s=1 \div 5$ $H=6 \div 25$ $b=3 \div 20$
	ЛПВД	2723-0223 2723-0239		
Чашечные	АЧК	2724-0001 2724-0084		$D=50 \div 250$ $d=16 \div 127$ $s=1,5 \div 7$ $H=20 \div 52$ $b=2 \div 20$
	ЛЧК	2724-0151 2724-0169		
	А1ЧК	2724-0100 2724-0106		$D=50 \div 160$ $d=16 \div 51$ $s=1 \div 3$ $H=22 \div 42$ $b=3 \div 10$

Вид круга, головки	Тип	Обозначение	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
Чашечные	А2ЧК	2724-0121 2724-0132		$D=50 \div 160$ $d=16 \div 51$ $s=3 \div 5$ $H=20 \div 40$ $b=3 \div 5$
Тарельчатые	АТ	2725-0001 2725-0022		$D=50 \div 150$ $d=16 \div 51$ $s=1,5$ $H=6 \div 16$ $b=1 \div 10$
	ЛТ	2725-0151 2725-0164		
	А1Т	2725-0031 2725-0046		$D=50 \div 150$ $d=16 \div 51$ $s=1,5 \div 3$ $H=6 \div 16$ $b=1 \div 5$
	Л1Т	2725-0165 2725-0175		
	А3Т	2725-0061 2725-0080		$D=32 \div 150$ $d=10 \div 51$ $s=1,0 \div 3$ $H=6 \div 16$ $b=1,5 \div 10$
	Л3Т	2725-0176 2725-0183		
	А4Т	2725-0101 2725-0145		$D=125 \div 300$ $d=32 \div 76$ $s=2 \div 3$ $H=13 \div 25$ $b=4 \div 40$
Плоские с двусторонним коническим профилем	А2П	2727-0001 2727-0078		$D=25 \div 400$ $d=6 \div 203$ $\alpha=30 \div 90°$ $H=3 \div 10$ $b=2 \div 5$
	Л2П	2727-0101 2727-0116		
Плоские с полукруглым выпуклым профилем	А5П	2729-0001 2729-0030		$D=50 \div 150$ $d=16 \div 51$ $s=2 \div 7$ $H=2 \div 32$ $R=1 \div 16$

Вид круга, головки	Тип	Обозначение	Эскиз сечения	Предельные размеры, мм
Отрезные	АОК	2726-0061 2726-0104		$D=50 \div 400$ $d=12 \div 76$ $H=0,15 \div 2,2$ $s=2,5 \div 5,0$
Отрезные сегментные: с нормальными межсегментными пазами	—	2726-0019 2726-0049		$D=250 \div 2000$ $d=32 \div 200$ $H=2,6 \div 12,0$ $s=5 \div 7$
с узкими межсегментными пазами	—	2726-0001 2726-0018		$D=250 \div 800$ $d=31 \div 90$ $H=2,6 \div 5,5$ $s=5$
Головки цилиндрические	АГЦ	2748-0001 2748-0024		$D=3 \div 20$ $d=2 \div 8$ $H=3 \div 20$ $L=40 \div 80$
Угловые	АГУ	2748-0031 2748-0039		$D=6 \div 20$ $d=3 \div 8$ $H=3 \div 15$ $L=40 \div 80$
Конические	АГК	2748-0051		$D=6 \div 20$ $d=3 \div 8$ $H=6 \div 18$ $L=40 \div 80$
Конические усеченные	АГКу	2748-0071 2748-0079		$D=6 \div 20$ $d=3 \div 8$ $H=4 \div 12$ $L=40 \div 80$
Сводчатые	АСГв	2748-0091 2748-0099		$D=6 \div 20$ $d=3 \div 8$ $r=1,5 \div 3,5$ $H=9 \div 24$ $L=70 \div 80$
Полушаровые	АГПш	2748-0101 2748-0109		$D=6 \div 20$ $d=3 \div 8$ $H=6 \div 14$ $L=40 \div 80$

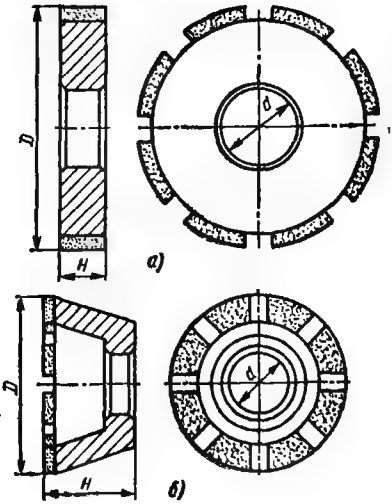
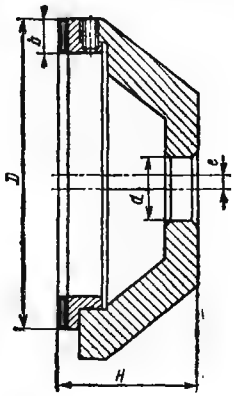


Рис. 2.8. Прерывистые алмазные круги форм АПП (*а*) и АЧК (*б*)

Рис. 2.9. Алмазный круг с эксцентричным расположением алмазоносного слоя



Определенные достоинства имеют чашечные алмазные круги с эксцентричным расположением алмазоносного слоя (рис. 2.9) [50]. Применение таких кругов для шлифования твердых сплавов приводит к снижению удельного расхода алмазов, сил и температуры резания, а также к некоторому улучшению качества обработки. Исследованиями установлено, что для алмазных кругов АЧК $D = 125 \div 150$ мм и $b = 10$ мм оптимальная величина эксцентриситета равна 5 мм.

Перспективными являются алмазные круги с упорядоченным расположением зерен [6], которое обеспечивает их геометрическую ориентацию и расстановку на рабочей части инструмента по заданной программе. Инструменты с упорядоченным расположением зерен по сравнению с обычными алмазными кругами отличаются повышенной производительностью, более низким удельным расходом алмазов; их применение способствует снижению температуры в зоне обработки.

К повышению производительности процесса при одновременном улучшении качества обработки приводит глубинное шлифование деталей алмазными кругами типа А2ЧК с углом наклона алмазоносного слоя 10° (по ГОСТ 16174—70 этот угол равен 25°) и типа АЧК, но с заборным конусом на наружной части алмазоносного слоя с углом 12—15° на ширине 3—5 мм.

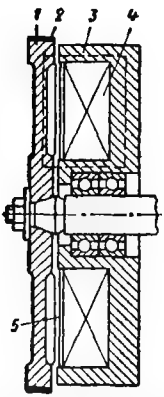


Рис. 2.10. Алмазный круг с изменяющимся диаметром

Интерес представляют алмазные круги, размеры корпуса которых можно изменять для обеспечения весьма малых подач без механизма подачи станка. Корпус такого круга изготовляют из магнитострикционного материала. При намагничивании корпуса [60] его размеры изменяются и тем самым осуществляется микроподача (рис. 2.10). На корпус *1* наносят алмазоносный слой *2*. Магнитная система состоит из сердечника *3* катушки *4* и изоляционной прокладки *5*. Весьма плавное увеличение диаметра круга зависит от вида магнитострикционного материала и составляет от 5 до 13,5 мкм (для круга $D = 300$ мм).

Марки шлифпорошков и микропорошков. Для изготовления алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов применяют шлифпорошки марок А, АСО, АСР, АСВ, АСК, ЛО, ЛР, КО и КР и микропорошки марок АМ, АН, АСМ, АСН, ЛМ и КМ.

Зернистость. Зернистость алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов в соответствии с ГОСТ 9206—70 определяется зернистостью используемых для их изготовления шлифпорошков и микропорошков (см. § 1.3).

Концентрация. Одним из весьма важных параметров алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов является концентрация алмазов, которая определяется массовым их содержанием в рабочем слое инструмента. В США и Англии за 100%-ную концентрацию принимают содержание 72 карат алмазов в одном кубическом дюйме алмазоносного слоя. При пересчете в метрическую систему это соответствует 4,3937 карат/см³. Многие иностранные фирмы принимают за 100%-ную концентрацию содержание 4,4 карата алмазов в 1 см³ алмазоносного слоя; это содержание рекомендуется и для отечественной практики. Таким образом, массовое содержание алмазов в каратах в инструменте можно определить по формуле

$$P = \frac{4{,}4VK}{100},$$

где P — масса алмазов, карат; V — объем алмазоносного слоя, см³; K — концентрация алмазов, %.

За 100-ную концентрацию принимают такое содержание алмаза (эльбора, кубонита), которое составляет примерно 25% объема рабочего слоя инструмента независимо от типа связки. Шлифовальные круги выпускают с концентрацией 25, 50, 75, 100, 150%. По специальным заказам круги можно изготовлять со 175 и 200%-ными концентрациями.

Связка. Связка алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов во многом определяет их эксплуатационные свойства. Она не только удерживает режущие зерна в рабочем слое инструмента, но и влияет на производительность обработки и качество шлифованных поверхностей, оказывает полирующее действие, способствует снижению коэффициента трения и адгезии с обрабатываемыми поверхностями, обеспечивает работу инструмента в режиме самозатачивания, обусловливает прочность, жесткость и износостойкость рабочего слоя круга, участвует в образовании и отводе тепла из зоны обработки. Существенное влияние оказывает наполнитель, который приводит в одних случаях к повышению прочности, твердости и износостойкости связки, в других — к интенсификации процесса резания, в третьих — к улучшению теплоотвода в круг. Суммарный объем алмазного, эльборового и кубонитового шлифпорошка (микропорошка) и наполнителя составляет 50% объема рабочего слоя круга.

Для решения весьма широкого круга задач, возникающих при шлифовании (резке) различных материалов алмазными, эльборовыми и кубонитовыми кругами, разработано большое количество рецептур связок, которые по роду основного связующего компонента разделяются на органические, металлические и керамические. В отдельную группу входят каучукосодержащие связки, применяемые для изготовления эластичных полированных кругов.

Органические связки состоят из фенолформальдегидных смол и различных композиций на их основе, которые при горячем прессовании бакелизируются в твердое и достаточно прочное вещество, удерживающее режущие зерна в рабочем слое инструмента. Температура нагрева при прессовании зависит от метода и режима бакелизации, а также типа смолы или компаунда (смолы и наполнителя). Обычно прессование производят при температуре 180° С и давлении 500—750 кгс/см². Время бакелизации составляет 2—8 ч. Органическая связка обеспечивает хорошее самозатачивание круга при его работе, она достаточно прочная и вязкая, но имеет сравнительно небольшую жесткость; поэтому круги на органической связке изготовляют чаще всего с наполнителем, в качестве которого используют абразивные шлифпорошки (карбид бора, карбид кремния, электрокорунд), а также металлические и минеральные порошки.

Металлические связки являются многокомпонентными системами. Формование рабочих слоев инструментов на металлических связках производится в пресс-формах путем прессования исходной порошковой шихты с приданием связке заданных физико-механических свойств при установлении соответствующего режима спекания и регулирования некоторых других процессов. Металлические

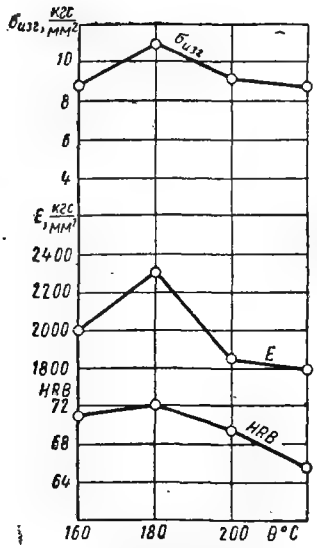


Рис. 2.11. Влияние температуры термической обработки на физико-механические свойства алмазоносного слоя

связки изготовляют из различных композиций на основе меди, олова, железа, алюминия, цинка, никеля, кобальта и некоторых других металлов. Наиболее широкое применение находят связки типа оловянистых бронзы, легированные металлическими порошками и мелкодисперсными частицами окислов и силикатов. Металлические связки отличаются высокой прочностью и износоустойчивостью и этим определяется область их применения. В некоторые металлические связки добавляют наполнитель (электрокорунд, карбид кремния, карбид бора). Перспективным наполнителем являются высокотемпературные твердые связки, глинозем и некоторые другие, способствующие интенсификации процесса шлифования и обеспечивающие возможность работы без охлаждения.

Керамические связки удерживают режущие зерна более прочно, чем органические, но менее прочно, чем металлические связки. Керамические связки отличаются хрупкостью, и поэтому круги с этими связками хорошо самозатачиваются. Круги на керамических связках изготовляют с наполнителем или без наполнителя.

В табл. 2.34 [7, 63, 93, 96, 99] представлена номенклатура связок, нашедших применение в практике.

Связки Б1, Б2, Б3, Б156, ТО2, М1, М5, МВ1, МС3, МС6, МО13, МИ, МКИ, К1, К5, С10, Р1 и Р3 находят широкое практическое применение; связки Б4, Б8, БР, КБ, М15, М58, МС1, МС2, МС11, МС15, МО4, МО7, МО8, МО16, МИ2, МКИ5, ОМК3, СК, Р5, Р8, Р9 и Р14 используют сравнительно редко, а связки БИ1, БП1, БП2, МО13Э, ИМ, МН1, ОП2, ОП3, С22 и К19 являются экспериментальными.

В табл. 2.35 приведены физико-механические свойства некоторых связок, а также алмазоносных слоев [91, 117].

На рис. 2.11 представлены результаты исследований [8] влияния температуры термической обработки на твердость *HRB*, модуль упругости *E* и предел прочности при изгибе $\sigma_{изг}$ образцов, изготовленных из алмазоносного слоя АСР125/100ТО2 100%. С изменением температуры термической обработки от 160 до 220° С прочностные характеристики алмазоносного слоя изменяются немонотонно: максимум значений *HRB* и $\sigma_{изг}$ наблюдается при температуре 180° С. По-видимому, более высокая температура термической обработки вызывает частичную деструкцию органической связки, приводящей к снижению прочностных свойств материала, а более низкая температура не способствует протеканию физико-химических превращений, обусловливающих повышение механических свойств алмазоносного слоя.

Теплофизические свойства алмазных и эльборовых кругов можно определить экспериментальным методом, а также путем расчета. Средний коэффициент теплопроводности круга можно рассчитывать по формуле [81]

$$\lambda_к = \lambda_1^{p_1}\lambda_2^{p_2}\ldots\lambda_m^{p_m},$$

где $\lambda_1, \ldots, \lambda_m$ — коэффициенты теплопроводности всех m компонентов круга, включая режущие зерна и воздушные поры; $p_1, \ldots, p_m$ — относительные объемные концентрации компонентов $\left(\sum_1^m p_m = 1\right)$.

Пример. рассчитать коэффициент теплопроводности алмазного круга на связке В1 при концентрации К = 100%.

Таблица 2.34

Связки для алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов

Марка связки	Марка зерен	Наполнитель	Назначение
		Органические связки	
Б1	АСО, АСВ, АСМ, ЛО, ЛМ, КО, КМ	Карбид бора	Чистовое, плоское, круглое, внутреннее, бесцентровое, профильное, прерывистое шлифование деталей; чистовое резьбошлифование; заточка и доводка однолезвийного и многолезвийного металлорежущего инструмента, ножей, хирургического инструмента
Б2	АСО, АСР, ЛО, КО	Железный порошок	Профильное шлифование деталей; чистовое шлифование резьб; заточка и доводка режущих инструментов; шлифование стружколомающихся канавок на передних поверхностях инструмента
Б3	АСО, АСР, АСМ, КО	Электрокорунд, графит коллоидальный	Чистовое, плоское, круглое, внутреннее, бесцентровое шлифование деталей; шлифование зубьев зубчатых колес; чистовая заточка и доводка однолезвийного и многолезвийного инструмента
Б4	АСО, КО	Карбид кремния зеленый	Чистовое зубошлифование
Б5	АСО, АСР, АСМ, КО, КМ	Тальк	Чистовое, плоское, круглое, бесцентровое шлифование деталей; чистовое зубошлифование; заточка и доводка медицинского инструмента
Б156	АСО, АСР, АСМ, ЛО, КО, ЛМ, КМ	Теплопроводные металлические порошки, порошки минеральных наполнителей	Плоское, круглое, бесцентровое, внутреннее, прерывистое, профильное шлифование деталей; чистовое шлифование резьб; заточка и доводка однолезвийного и многолезвийного металлорежущего инструмента, ножей, медицинских инструментов
БИ	АСО, АСМ	Резиновая мука	Доводочное шлифование деталей; шлифование цилиндрических деталей торцом круга
БП1	КО, КР	—	Шлифование деталей и инструмента с большими поперечными подачами
БП2	АСО, КО	—	То же

Марка связки	Марка верен	Наполнитель	Назначение
ТО2	АСО, АСР, АСМ, ЛО, ЛМ, КО, КМ	Карбид бора и медный порошок	Плоское, круглое, сферическое, бесцентровое, внутреннее шлифование деталей; чистовая заточка и доводка однолезвийного и многолезвийного режущего инструмента
КБ	АСО, АСР, АСМ, КО, ЛО	—	Плоское, круглое, бесцентровое шлифование деталей; заточка режущего инструмента вместе с державкой
ВИ1	АСО, ЛО, КО	Антифрикционные и поверхностно-активные присадки	Плоское, круглое шлифование деталей; заточка многолезвийного режущего инструмента с прямыми канавками
		Металлические связки	
М1	А, АСР, АСВ, АСМ, КР	—	Плоское, круглое, внутреннее шлифование деталей; плоское глубинное шлифование деталей и инструмента; резка деталей; шлифование резьб с мелким шагом
М3	АСВ, АСР, АСМ, АСК	—	Резка и обработка материалов
М5	АСО, АСР, АСВ	—	Плоское, круглое, глубинное электролитическое шлифование деталей; упругая электролитическая заточка режущего инструмента
М15	ЛО, ЛР	—	Электролитическое шлифование деталей и режущего инструмента
М19	ЛО, ЛР	—	Электролитическое шлифование деталей
М50	А	—	Плоское шлифование торцом круга
М52	АСР, АСВ	—	Плоское шлифование деталей
М58	АСР, АСВ	—	Глубинное шлифование деталей и режущего инструмента
М5-2	АСО	—	Плоское и круглое шлифование деталей
М5-6	АСВ	—	Шлифование резьб с охлаждением

Марка связки	Марка зерен	Наполнитель	Назначение
МВ1	АСР, АСВ, АСК, А, КР	—	Электролитическое шлифование деталей и заточка режущего инструмента; упругая электролитическая заточка режущего инструмента; совместная заточка инструмента по режущей части и державке
МС1	АСР, АСВ	—	Плоское, круглое, прерывистое шлифование деталей; заточка многолезвийного режущего инструмента
МС2	АСР, АСВ	—	Черновое, плоское, круглое, шлифование; заточка режущего инструмента
МС3	АСР, АСВ, А	Высокотемпературная твердая смазка и глинозем	Плоское шлифование деталей, резьб; электролитическое шлифование деталей и заточка режущего инструмента
МС6	АСР, АСВ	Высокотемпературная смазка	Плоское, прерывистое шлифование деталей; шлифование канавок для завивания стружки на передних поверхностях режущего инструмента; электролитическое шлифование
МС11	АСР, АСВ	—	Плоское, круглое шлифование деталей, заточка режущего инструмента
МО3	А, АСК, АСР, АСВ	—	Обработка и резка материалов
МО4	АСО, АСР, АСВ, АСК, КО, КР	—	Плоское, внутреннее, круглое, бесцентровое шлифование деталей, в том числе глубинное, совместное электролитическое шлифование режущей части и державки инструмента; резка материалов
МО7	АСР, АСВ	—	Шлифование резьб
МО8	АСВ, АСМ	—	Плоское, круглое, фасонное шлифование деталей; многониточное шлифование резьб, фасетирование
МО12	АСМ	—	Плоское, круглое шлифование деталей
МО13	АСО, АСР, АСВ, А, КР	Карбид бора	Плоское, круглое шлифование деталей (в том числе глубинное); глубинная электролитическая заточка режущего инструмента

Марка связки	Марка зерна	Наполнитель	Назначение
МО13Э	АСР, АСВ	Карбид бора	Электролитическая заточка режущего инструмента совместно с державкой
МО15	АСВ	—	Шлифование и фасетировка деталей
МО16	АСВ, АСР, АСК, КР	—	Плоское, круглое, фасонное шлифование деталей
МИ	АСО, АСР, АСВ, А	Электрокорунд	Плоское, круглое шлифование деталей; заточка режущего инструмента; шлифование стружкозавивающих канавок на передних поверхностях режущего инструмента
МИ2	АСР, АСВ	Электрокорунд	Заточка однолезвийного режущего инструмента
МКИ	АСР, АСВ	—	Заточка и доводка режущего инструмента совместно с державкой
МКИ5	АСР, АСВ	—	Плоское, круглое шлифование деталей; заточка режущего инструмента
МК	АСР, АСВ	—	То же
МП1	АСВ	—	»
ТМ2	АСВ	—	
МН1	АСВ	—	Глубинное шлифование деталей
МТ	АСВ, АСК, АСМ	—	Обработка и резка материалов
МЖ	АСВ, АСК, АСМ	—	То же
ОМК3	АСР, АСВ	—	Плоское шлифование деталей; заточка режущего инструмента
ОМ5-1	ЛО	—	Плоское, круглое шлифование деталей
ОП2	ЛО, ЛР	—	То же
ОП3	ЛО, ЛР	—	То же
С22	АСВ	—	Плоское, сферическое шлифование деталей

Марка связки	Марка зерен	Наполнитель	Назначение
		Керамические связки	
К1	АСР, АСВ	Карбид бора	Плоское, круглое, прерывистое шлифование деталей; заточка режущих инструментов вместе с державкой
К5	АСР, АСВ	То же	Плоское, круглое шлифование деталей; заточка режущего инструмента
К16	АСМ	«	То же
К19	КО, ЛО	«	Чистовое, плоское, круглое шлифование деталей; заточка и доводка режущего инструмента
С10	КО, ЛО	«	То же
СК	АСМ	Карбид кремния, электрокорунд	Чистовое шлифование экранов кинескопов
		Каучукосодержащие связки	
Р1	АСО, АСР, АСМ	—	Изготовление микрошлифов; полирование материалов
Р3	АСМ	—	Полирование материалов
Р9	АСО, АСМ	—	Полирование деталей
Р14	АСО, АСМ	—	Доводка и полирование деталей

Таблица 2.35

Физико-механические свойства связок и алмазоносных слоев

Связка и алмазоносный слой	Плотность, г/см³	Твердость *HRB*	Модуль упругости, кгс/мм²
Связка:			
ТО2	2,710 ±0,011	63,1 ±1,9	1337 ±28
МО4	4,0 ±0,1	96 ±10	—
МО13	3,5 ±0,1	95 ±10	—
СК	—	100—110	—
Алмазоносный слой АСР 125/100 ТО2 100%	2,851 ±0,020	69,2 ±3,7	1904 ±80

Связка и алмазоносный слой	Предел прочности при изгибе, кгс/мм²	Ударная вязкость, кгс·м/см²	Коэффициент линейного расширения ($\times 10^{-6}$), 1/°С	Удельное электросопротивление, Ом·мм²/м
Связка:				
ТО2	8,15+0,27	—	22,3 ±1,7	32,9+5,8
МО4	15,3 ±1,5	0,019 ±0,002	—	—
МО13	18,0 ±2,0	0,012 ±0,001	—	—
СК	3,0—6,3	0,021—0,026	—	—
Алмазоносный слой АСР 125/100 ТО2 100%	8,20 ±0,59	—	—	109,9 ± 17,7

При К = 100% относительная объемная концентрация алмазов $p_1 = 0{,}25$. В связке Б1 содержится наполнитель в виде зерен карбида бора, причем объем наполнителя равен объему алмазов, т. е. $p_3 = p_1 = 0{,}25$. Объем пор примем $p_2 = 0{,}02$, т. е. 2% в объеме круга. Оставшийся относительный объем $p_4 = 0{,}48$ занимает бакелит. Имея в виду значения коэффициентов теплопроводности для алмаза ($\lambda_1 = 0{,}35$), карбида бора ($\lambda_3 = 0{,}038$), бакелита ($\lambda_4 = 0{,}0005$) и для воздуха ($\lambda_2 = 6{,}4 \cdot 10^{-5}$ кал/(см·с·град), получаем

$$\lambda_к = 0{,}35^{0{,}25} \cdot 0{,}038^{0{,}25} \cdot 0{,}000064^{0{,}02} \cdot 0{,}0005^{0{,}48} \approx 0{,}002 \text{ кал/см·с·°С}.$$

В табл. 2.36 приведены экспериментальные значения теплопроводности $\lambda_к$, температуропроводности $a_к$ и объемной теплоемкости cy для связок и для алмазоносных и эльбороносных слоев кругов [40, 100]. Теплофизические свойства материалов, как известно, изменяются с изменением температуры. Теплопроводность алмазоносного слоя на связках Б1, Б2, Б3, Б8 и БР с зерном АСО80/63 и концентрацией 60% уменьшилась с повышением температуры от 20 до 300° С соответственно в 1,85; 1,33; 1,17; 1,57; 1,35 раза, а при концентрации 100% в 1,31; 1,30; 1,42; 1,33 и 1,43 раза [100]. В общем, снижение значений коэффициентов теплопроводности при увеличении температуры в 15 раз относительно невелико, и это дает основания при расчетах температур, возникающих при алмазном шлифовании, не учитывать изменение теплофизических свойств (что существенно упрощает аналитические расчеты температур), принимая средние значения коэффициентов теплопроводности и температуропроводности.

Технические требования к алмазным, эльборовым и кубонитовым кругам и головкам. Технические требования на алмазные шлифовальные круги приведены в ГОСТ 16181—70, алмазные шлифовальные головки в ГОСТ 17122—71, алмазные отрезные круги в ГОСТ 10110—71, алмазные сегментные отрезные круги в ГОСТ 16117—70. Технические требования на алмазные инструменты содержат собственно технические требования, правила приемки и методы испытаний, условия маркировки, упаковки, транспортирования и хранения, а также гарантии поставщика.

В соответствии с техническими требованиями корпуса алмазных шлифовальных кругов изготовляют из сталей марок Ст3, 20, 25 и 30 или из алюминиевого сплава марок АК6 или Д16. Сплавы АК6 и Д16 применяют обязательно, если алмазоносный слой круга крепят к корпусу с помощью переходного элемента (кольца), для изготовления которого используют стали марок Ст3, 20, 25 и 30. Между алмазоносным слоем и корпусом круга (переходным кольцом) допускается наличие промежуточного безалмазного слоя.

Корпуса алмазных головок изготовляют из сталей Р9 или Р18. Головки на органической связке допустимо выпускать с корпусами из стали У12А с термообработкой до твердости *HRC* 56—60. Корпуса отрезных кругов изготовляют из листовой холоднокатаной стали 08кп, при этом сортамент проката должен соответствовать ГОСТ 503—71. Корпуса отрезных сегментных кругов изготовляют из сталей 9ХФ либо 50Г, 60Г и 65Г. Твердость корпуса должна соответствовать *HRC* 39—44. Сегменты следует припаивать серебряным припоем ПСр-45

Таблица 2.36

Теплофизические свойства связок, алмазоносных и эльбороносных слоев

Характеристика образцов и кругов	Температуропроводность $a_к$, см²/с	Объемная теплоемкость $c\gamma$, кал/см³·°С	Теплопроводность $\lambda_к$, кал/см·с·°С
Связка:			
ТО2	0,0109	0,426	0,00462
Б1	0,0041	0,414	0,00170
Б3	0,0102	0,372	0,00038
Б4	0,0175	0,337	0,00059
Б156	0,0110	0,347	0,00383
КБ	0,0014	0,329	0,00046
АСР125/100ТО2 100%	0,0245	0,430	0,01054
АСО315/250Б1 50%	—	—	0,00375
АСО100/80Б1 50%	—	—	0,00410
АСО100/80Б1 100%	—	—	0,00470
АСО80/63Б1 50%	—	—	0,00337
АСО80/63Б1 100%	—	—	0,00407
АСО80/63Б2 50%	—	—	0,00384
АСО80/63Б2 100%	—	—	0,00624
АСО80/63Б3 50%	—	—	0,00337
АСО80/63Б3 100%	—	—	0,00412
АСО80/63Б8 50%	—	—	0,00183
АСО80/63Б8 100%	—	—	0,00193
АСО80/63БР 50%	—	—	0,00067
АСО80/63БР 100%	—	—	0,00183
АСО60/40Б1 50%	—	—	0,00466
АСР160/125Б1 50%	0,0079	0,768	0,00612
АСО250/200Б1 50%	0,0097	0,510	0,00494
АСО160/125Б1 100%	0,0121	0,672	0,00816
АСО160/125Б1 150%	0,0184	0,755	0,01390
АСР160/125К1 50%	0,0057	0,743	0,00425
АСР160/125М1 50%	0,0139	0,861	0,12000
АСР160/125М1 100%	0,0162	0,925	0,15000
АСР160/125МС1 50%	0,0108	0,676	0,07320
АСР160/125МС1 100%	0,0119	0,797	0,09530
АСВ160/125МС6 50%	0,0107	0,803	0,08590
ЛО50/40С10 50%	0,0061	0,355	0,00217
ЛО50/40С10 100%	0,0071	0,340	0,00241
ЛО50/40С10 150%	0,0077	0,327	0,00252
ЛО28/20С10 50%	0,0050	0,234	0,00167
ЛО28/20С10 100%	0,0069	0,317	0,00219
ЛО28/20С10 150%	0,0071	0,331	0,00235
ЛО50/40КБ 50%	0,0029	0,359	0,00104
ЛО50/40КБ 100%	0,0044	0,369	0,00163
ЛО50/40КБ 150%	0,0057	0,354	0,00202
ЛО28/20КБ 50%	0,0027	0,352	0,00095
ЛО28/20КБ 100%	0,0039	0,365	0,00142
ЛО28/20КБ 150%	0,0064	0,381	0,00244
ЛО50/40Б1 100%	0,0062	0,436	0,00261
ЛО50/40Б1 150%	0,0073	0,412	0,00301
ЛО28/20Б1 100%	0,0065	0,416	0,00270
ЛО28/20Б1 150%	0,0070	0,408	0,00286

(ГОСТ 8190—56) или иным припоем, обеспечивающим прочность их крепления к корпусу при отсутствии графитизации алмазов.

Алмазные, эльборовые и кубонитовые зерна должны быть полностью вскрыты на рабочих поверхностях шлифовальных и отрезных кругов и головок и не менее чем на 50% поверхности сегмента у сегментных отрезных кругов. Допускаемые отклонения геометрических размеров кругов и головок приведены в табл. 2.37.

Предельные отклонения от параллельности и перпендикулярности, допустимые значения радиального и торцового биения рабочей поверхности шлифовальных кругов относительно поверхности посадочного отверстия (кроме кругов формы А1ПП) регламентированы VII степенью точности по ГОСТ 10356—63, а кругов формы А1ПП — IX степенью точности.

Для сегментных отрезных кругов имеются специальные нормы точности по предельным отклонениям толщины (от 0,05 до 0,25 мм, в зависимости от D) в одном корпусе, по разности двух любых окружных шагов (0,6 мм для шага до

Таблица 2.37

Допускаемые посадки и отклонения геометрических размеров (мм) алмазных и эльборовых кругов и головок

Геометрический параметр инструмента	Форма круга и головки			
	Все, кроме А1ПП	А1ПП	Отрезные сегментные	Все формы головок
Диаметр посадочного отверстия (хвостовика) d	A	A_1	+0,05 ÷ +0,09, в зависимости от d	G_3
Наружный диаметр D	По 5-му классу точности шлифовальных кругов; +0,17 ÷ +0,38 для отрезных кругов в зависимости от D	G_1	+0,30 ÷ +0,75, в зависимости от D	B_1
Ширина рабочей части H или b	По 5-му классу точности с симметричным расположением поля допуска для шлифовальных кругов; +0,02 ÷ +0,10 для отрезных кругов в зависимости от H	—	−0,12 ÷ −0,36, в зависимости от H	B_2
Толщина алмазоносного слоя s	По 5-му классу точности с симметричным расположением поля допуска	—	По 5-му классу точности	B_1

Примечание. Остальные размеры должны выполнять по 7-му классу точности

40 мм и 0,8 мм — свыше 40 мм), по неплоскостности боковых поверхностей (от 0,10 до 0,70 мм, в зависимости от H), по радиальному и торцовому биению корпуса (соответственно 0,10—0,40 мм и 0,12—1,00 мм, в зависимости от D), по радиальному и торцовому биению рабочего слоя (соответственно 0,15—0,50 мм и 0,17—1,40 мм, в зависимости от D).

Шероховатость посадочных отверстий алмазных, эльборовых и кубонитовых шлифовальных кругов и хвостовиков головок должна соответствовать $Ra = 0{,}63 \div 1{,}25$ мкм, остальных поверхностей $Ra = 1{,}25 \div 2{,}5$ мкм.

Шлифовальные круги всех форм, изготовленные из шлифпорошков, испытывают на работоспособность с определением удельного расхода алмазов в миллиграммах на 1 г сошлифованного материала, эффективной мощности шлифования и шероховатости обработанных поверхностей. В соответствии с методикой определения работоспособности кругов (ГОСТ 16181—70, приложение 2) их испытывают на универсально-заточных, плоскошлифовальных, круглошлифовальных, внутришлифовальных и резьбошлифовальных станках при обработке образцов, изготовленных из твердых сплавов Т15К6, ВК6 или ВК15 (круги на металлических и органических связках), а также из стали Р18 или твердого сплава Т15К6 (круги на керамических связках).

Удельный расход алмазов q определяют для кругов, работающих торцом и периферией, соответственно по формулам

$$q = \frac{200Ph}{G_м h_a}; \qquad (2.13)$$

$$q = \frac{2{,}76 \cdot 10^{-2} DHKh}{G_м}, \qquad (2.14)$$

где P — масса алмазов в круге, караты; K — концентрация алмазов, %; h — линейный износ круга, [мкм в формуле (2.13) и в мм в формуле (2.14)]; h_a— толщина алмазоносного слоя до испытания, мкм; $G_м$ — масса материала, сошлифованного за время испытания, г; D — наружный диаметр круга, мм; H — высота круга, мм.

Если для определения величины q применяется весовой метод, то удельный расход алмазов рассчитывают по формуле

$$q = \frac{\alpha G_к}{G_м},$$

где α — коэффициент, учитывающий плотность связки и концентрацию алмазов в круге, значение которого указано в технических условиях на связку; $G_к$ — массовый износ алмазоносного слоя за опыт, мг.

В табл. 2.38 приведены нормативные показатели работоспособности алмазных кругов. При этом шлифуемые образцы изготовляют из твердых сплавов Т15К6, ВК6 или ВК15 (для испытания металлических и органических связок) или быстрорежущей стали Р18 (для испытания керамических связок).

Алмазные головки в соответствии с ГОСТ 17122—71 испытывают на удельный расход алмазов, массу твердого сплава ВК15, снимаемую каждым каратом алмаза до полного износа головки, производительность обработки, шероховатость обработанных поверхностей. Нормативные данные этих показателей представлены в табл. 2.39.

Таблица 2.38

Нормативные показатели работоспособности алмазных кругов

Вид шлифования	Форма круга	Шероховатость обработанной поверхности, мкм	Удельный расход алмазов, мг/г, не более			Эффективная мощность шлифования, кВт, не более
			при связке			
			металлической	органической	керамической	
Плоское	АПП, А2ПП	0,63—1,25	1,3 * 1,0	2,0 * 1,6	3,5 * 3,0	1,5
Круглое наружное	АПП, А2ПП	0,63—1,25	1,3 1,0	3,0 2,5	—	1,0
Круглое внутреннее	АПП, А1ПП	0,63—1,25	3,0 2,8	4,0 3,5	— —	Не измеряется
Торцовое	АЧК, АПВ, АПВД, АТ, А1Т, А3Т, А4Т, А1ЧК, А2ЧК	0,32—0,63	0,7 0,5	0,8 0,6	3,0 2,7	1,0
Профильное	А2П, А5П	0,63—1,25	1,0 0,8	1,2 1,0	— —	Не измеряется
Резьбошлифование	А2П	0,63—1,25	2,0 1,7	2,3 2,0	— —	

Примечание. Зернистость шлифпорошков принята 63/50 и крупнее.

* Зернистость шлифпорошков для кругов АПП равна 65/50 и крупнее.

Таблица 2.3 9

Нормативные показатели работоспособности алмазных шлифовальных головок

Форма головки	Зернистость	Удельный расход алмазов, мг/г, не более, для связки		Масса твердого сплава, г, снимаемая каждым каратом алмаза до полного износа головки, при связке		Шероховатость обработанной поверхности *Ra*, мкм
		металлической	органической	металлической	органической	
АГЦ	40/28, 60/40—50/40	— 4,2	— 5,8	— 86	— 29	0,32 0,63
	63/50 и крупнее	3,8	4,5	40	33	1,25
АГУ, АГК	40/28	3,0	6,0	20	10	—
АГКу	60/40—50/40	1,8	3,8	33	16	—
	63/50 и крупнее	1,5	3,0	40	20	—
АГСв	40/28	3,8	6,8	8	4	—
АГПш	60/40—50/40 63/50 и крупнее	3,3 3,0	6,0 5,3	9 10	5 6	— —

Маркировку алмазных кругов производят в соответствии с ГОСТ 16181—70, а головок — с ГОСТ 17122—71. Маркировку эльборовых кругов на керамической связке производят аналогично маркировке абразивных кругов, с указанием концентрации эльбора в процентах.

Каждый инструмент должен быть снабжен паспортом, содержащим, помимо маркировочных данных, еще и такие сведения, как масса алмазов (в каратах), допустимая рабочая скорость (в м/с) и иметь штамп технического контроля предприятия-изготовителя.

Круги следует хранить в помещении при температуре не ниже +5° С и относительной влажности воздуха не выше 85% (отрезные сегментные круги при влажности воздуха не выше 65%).

Балансировка алмазных и эльборовых кругов. Круги с наружным диаметром 100 мм и более, толщиной корпуса 5 мм и более и с массой от 0,10 до 50 кг необходимо статически балансировать в динамическом режиме. Предельные допустимые значения смещения центра тяжести круга относительно оси его вращения составляют 40, 32, 25 и 20 мкм для кругов, имеющих массу соответственно до 1, свыше 1 до 3, свыше 3 до 10 и свыше 10 до 50 кг.

Балансировку алмазных кругов производят на балансировочных станках общего назначения (мод. ДБ-3, ДБ-4, ДБ-5, ДБ-10 и др.), предназначенных для балансировки абразивных кругов, а также на станках, специально разработанных для балансировки алмазных кругов (мод. Э3-27, Э3-28). На станке Э3-27 используют способ автоматической балансировки кругов [3] путем нанесения на металлический корпус инструмента компенсирующего расплава. На станке Э3-28 автоматическое балансирование кругов с металлическим корпусом осуще-

ствляется за счет электрохимического растворния металла корпуса в «тяжелой» его части [4].

Рекомендации по выбору алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов и головок. В табл. 2.40 приведены обобщенные данные по выбору алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов и головок.

В табл. 2.41 даны общие рекомендации по выбору материала зерен, используемых для изготовления алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов.

Рекомендации по выбору связок приведены выше, в табл. 2.34.

Таблица 2.40

Выбор типа алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов и головок

Тип инструмента	Операция	Вид металлорежущего станка
АПП, ЛПП	Круглое, наружное, внутреннее, бесцентровое и плоское шлифование деталей и инструмента. Заточка и доводка инструмента	Круглошлифовальный, внутришлифовальный, бесцентрово-шлифовальный, плоскошлифовальный, универсальный и специальный заточные
А1ПП, Л1ПП	Внутреннее шлифование цилиндрических и конических поверхностей	Внутришлифовальный, координатно-шлифовальный, универсально-заточной
А2ПП	Круглое шлифование деталей и инструмента по наружному диаметру, торцам, уступам и фаскам за одну установку	Круглошлифовальный, универсальный, универсально-заточной
АПВ, ЛПВ	Плоское шлифование деталей, заточка и доводка инструмента	Плоскошлифовальный, универсальный и специальный заточные
АПВД, ЛПВД, АЧК, ЛЧК	То же	То же
А1ЧК	Заточка и доводка инструмента	Универсальный и специальный заточные
А2ЧК	Заточка и доводка многолезвийного инструмента с винтовыми зубьями по задним поверхностям	То же
АТ, ЛТ	Заточка и доводка многолезвийного инструмента по передним поверхностям	«
А1Т, Л1Т	Заточка и доводка многолезвийного и мелкоразмерного инструмента по передним поверхностям	«
А3Т, Л3Т	Заточка и доводка многолезвийного инструмента с винтовыми зубьями по передним поверхностям	«
АЧТ	Заточка и доводка червячных фрез и долбяков по передним поверхностям	«

Тип инструмента	Операция	Вид металлорежущего станка
А2П, Л2П	Профильное шлифование деталей, шлифование наружных и внутренних резьб, профилей зубьев зуборезного инструмента, шлифование канавок и лунок на инструменте	Профилешлифовальный, резьбошлифовальный, универсальный и специальный затылочные, заточные
А5П	Фасонное шлифование деталей и инструментов, вышлифовывание канавок и лунок на инструменте	Круглошлифовальный, профилешлифовальный, универсальный и специальный заточной
АОК	Разрезка твердых и хрупких материалов, шлифование канавок на деталях и инструменте	Круглошлифовальный, плоскошлифовальный, отрезной, универсальный заточной
Отрезные сегментные	Разрезка природных и искусственных строительных материалов	Универсальный и специальный разрезные
АГЦ	Внутреннее шлифование цилиндрических поверхностей деталей и инструмента	Внутришлифовальный, координатно-шлифовальный
АГУ, АГК, АГКу	Шлифование канавок, пазов, конических и фасонных внутренних поверхностей деталей, штампов, пресс-форм, волок	То же
АГСв, АГПш	Шлифование профильных и криволинейных внутренних поверхностей деталей, штампов, пресс-форм	

Таблица 2.41

Выбор материала зерен алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов

Марка зерна	Диапазон зернистости	Назначение	Обрабатываемый материал
Алмазные, эльборовые и кубонитовые шлифпорошки			
АСО, ЛО, КО	От 50/40 до 160/125	Изготовление инструмента на органических связках для чистового и доводочного шлифования	Твердые сплавы, инструментальные и быстрорежущие стали
АСР	От 63/50 до 250/200	Изготовление инструмента на керамических и металлических связках для чернового и чистового шлифования	Твердые сплавы, быстрорежущие стали, легированные, стали и чугуны
ЛР	От 50/40 до 250/200	Изготовление инструмента на керамических связках для чернового и чистового шлифования	Труднообрабатываемые, конструкционные, инструментальные, жаропрочные, нержавеющие стали и сплавы, быстрорежущие стали.

Марка зерна	Диапазон зернистости	Назначение	Обрабатываемый материал
КР	От 50/40 до 250/200	Изготовление инструмента на металлических и керамических связках для чистового и чернового шлифования	То же
АСВ	От 80/63 до 400/315	Изготовление инструмента на металлических связках, работающих при повышенных удельных нагрузках, обусловленных обработкой с интенсивными режимами шлифования	Твердые сплавы, труднообрабатываемые стали, сплавы и чугуны, инструментальные и быстрорежущие стали
АСК	От 100/80 до 500/400	Изготовление инструмента на металлических связках, работающих в особо тяжелых условиях	Гранит, мрамор, известняк и другие материалы
А	От 50/40 до 630/500	То же	Бетон, железобетон, горные породы, абразивы и другие материалы
Алмазные, эльборовые и кубонитовые микропорошки			
АСМ, АМ, ЛМ КМ	От 1/0 до 60/40	Изготовление инструмента, применяемого для доводочной обработки	Твердые сплавы, труднообрабатываемые конструкционные и инструментальные стали, стекло и другие твердые материалы
АСН, АН	От 1/0 до 60/40	Изготовление инструмента для доводочной обработки	Природные и синтетические алмазы, корунды, керамики и другие хрупкие сверхтвердые материалы

В табл. 2.42 даны рекомендации по выбору зернистости алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов в зависимости от требований к шероховатости обработанных поверхностей.

Концентрацию алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов необходимо выбирать исходя из условий эксплуатации инструмента, обусловленных характером технологической операции, производительностью процесса, расходом и стойкостью кругов, величиной сил шлифования, типом производства, экономическими соображениями. На выбор концентрации кругов влияет также вид связки и материал режущих зерен. С увеличением концентрации повышаются производительность шлифования, износостойкость и кромкостойкость кругов, снижаются силы резания, уменьшается себестоимость шлифовальных операций. Исходя из этого, профильное шлифование и резьбошлифование деталей целесообразно производить кругами со 100 и 150%-ной концентрацией; предварительное, глубинное, а также чистовое шлифование деталей, заточку и доводку режущих инструментов — со 100 и 150%-ной концентрацией; доводочное шлифование мелкозернистыми кругами, алмазную обработку деталей и инструментов в условиях мелкосерийного производства — с 50 и 75%-ной концентрацией; при использовании для кругов металлических связок — со 100 и 150%-ной концентрацией, керамических — со 100%-ной и органических — с 50, 75 и 100%-ной концентрациями.

Таблица 2.42

Выбор зернистости алмазных, эльборовых и кубонитовых кругов

Шероховатость *Ra*, мкм	Связка круга		
	Органическая	Металлическая	Керамическая
0,63—1,25	200/160—125/100	160/125—125/100	160/125—125/100
0,32—0,63	160/125—100/80	125/100—70/63	125/100—80/63
0,16—0,32	100/80—50/40	80/63—50/40	80/63—50/40
0,08—0,16	50/40—40/28	—	63/50—40/28
0,04—0,08	40/28—14/10	—	—
0,04	14/10—5/3	—	—

§ 2.4. Процесс резания при шлифовании абразивным и алмазным инструментом

Шлифовальный круг в отличие от другого многозубого (лезвийного) инструмента имеет множество режущих элементов, в большинстве своем неправильной формы, расположенных в случайном порядке. В связи с этим геометрические характеристики круга как режущего инструмента и параметры процесса резания при шлифовании должны быть определены с учетом особенностей расположения единичных режущих элементов на рабочей поверхности круга. Ниже сформулированы некоторые понятия, относящиеся к процессу резания и инструменту при шлифовании, и даны основные расчеты, позволяющие описать его режущую часть.

Обрабатываемая поверхность детали — поверхность, с которой удаляют материал шлифованием при данном проходе инструмента.

Обработанная поверхность детали — сложная поверхность с вероятностным расположением отдельных элементов микрогеометрии, образовавшаяся как результат удаления обрабатываемого материала активными зернами круга.

Номинальная поверхность контакта круга с деталью — проекция фактической поверхности контакта на условную наружную поверхность круга.

Условная наружная поверхность круга — поверхность геометрически правильной формы, проведенная через вершинки наиболее выступающих зерен в рабочем слое инструмента Δ_{max} (рис. 2.12). В дальнейшем, с целью упрощения записи, эта поверхность будет называться наружной поверхностью круга.

Условная поверхность связки — поверхность геометрически правильной формы, заменяющая с наибольшим приближением фактическую поверхность связки в межзерновом пространстве инструмента. В дальнейшем, с целью упрощения записи, эта поверхность именуется поверхностью связки круга.

Рабочий слой круга — слой, расположенный между наружной поверхностью круга и поверхностью связки. Толщина рабочего слоя инструмента Δ_{max} — раз-

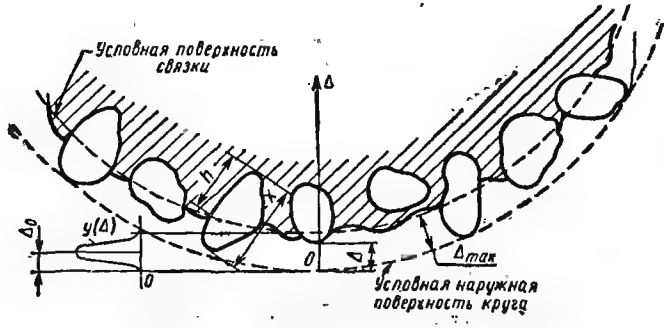


Рис. 2.12. Схематизация рабочего слоя шлифовального круга

мер слоя в плоскости, перпендикулярной к окружной скорости круга. Значения Δ_{max} могут быть определены экспериментально, или ориентировочно рассчитаны по формуле

$$\Delta_{max} \approx x_{max}(1-\varepsilon) = (\bar{x} + 3\sigma)(1-\varepsilon), \tag{2.15}$$

где $x_{max} = \bar{x} + 3\sigma$ — наибольший размер зерен в круге; ε — коэффициент, учитывающий заделку зерен в связке.

Для узкого диапазона зернистостей алмазных и эльборовых кругов $\sigma \approx \approx 0{,}12\bar{x}$ и $\Delta_{max} \approx 1{,}36\bar{x}(1-\varepsilon)$.

Рабочая поверхность круга (рис. 2.12) — любая поверхность геометрически правильной формы, эквидистантная наружной поверхности круга в пределах рабочего слоя инструмента. То или иное конкретное значение вылета зерна Δ носит случайный характер. Распределение значений Δ в пределах от 0 до Δ_{max} с достаточной надежностью можно описать законом нормального распределения. Опыт показывает, что кривая распределения $y(\Delta)$ имеет центр группирования на расстоянии $\Delta_0 \lessdot 0{,}5\Delta_{max}$ от наружной поверхности круга; в общем случае $\Delta_0 = (0{,}5 - b)\Delta_{max}$, причем $b = 0{,}05 \div 0{,}20$ (чаще всего $b \approx 0{,}15$). Среднее квадратичное отклонение распределения $y(\Delta)$ удовлетворительно описывается выражением

$$\sigma_0 \approx \frac{\Delta_{max}}{6} = \frac{1}{6}(\bar{x} + 3\sigma)(1-\varepsilon). \tag{2.16}$$

Номинальное количество зерен в единице объема шлифовального инструмента n_w — средневероятное количество зерен, содержащихся в единице объема любого участка внутри шлифовального инструмента. Если размеры зерен x круга распределены по нормальному закону, а форма зерна приближенно описывается эллипсоидом вращения, то [82]

$$n_W = \frac{6\varkappa}{\pi\alpha^2\bar{x}(\bar{x}^2 + 3\sigma^2)}, \tag{2.17}$$

где $\varkappa$ — *доля, занимаемая шлифующим материалом в единице объема круга.*

Для алмазных и эльборовых кругов $\varkappa = \frac{K}{400}$, где K — концентрация, %.

Для кругов, содержащих алмазные или эльборовые зерна узкого диапазона зернистости,

$$n_W \approx \frac{3}{200\pi}\,\frac{K}{\alpha^2\bar{x}^3}. \tag{2.18}$$

В формулах (2.17) и (2.18) α — коэффициент формы зерна.

Номинальное количество вершинок зерен (n_0) в объеме рабочего слоя круга, расположенном над единицей поверхности связки. Количество вершинок зерен, содержащихся в рабочем слое инструмента, равно количеству зерен, видимых на поверхности связки. С помощью вероятностных расчетов можно получить

$$n_0 = \frac{6\varkappa}{\pi}\,\frac{J(\alpha)}{\alpha^2(\bar{x}^2 + 3\sigma^2)}. \tag{2.19}$$

График функции $J(\alpha)$, зависящей от коэффициента формы зерен, приведен на рис. 2.13.

Для алмазных и эльборовых кругов $\left(\varkappa = \frac{K}{400}\right)$ при узком диапазоне зернистости

$$n_0 \approx \frac{3K}{200\pi}\,\frac{M(\alpha)}{\bar{x}^2} \approx \frac{3K}{200\pi}\,\frac{1}{\alpha^{3/2}\bar{x}^2}. \tag{2.20}$$

График функции $M(\alpha) \approx \frac{1}{\alpha^{3/2}}$ приведен на рис. 2.13.

Пример. Определить номинальное количество зерен на 1 мм² рабочего слоя для алмазного круга зернистостью 100/80 при $K = 100\%$.

По табл. 1.17 находим для шлифпорошка 100/80 среднее значение размера зерен $\bar{x}_м = 0{,}09$ мм. Для перехода от характеристики распределения по массе к характеристикам распределения по количеству воспользуемся формулами, указанными на стр. 30, и получим

$$\bar{x} = 0{,}96\bar{x}_м = 0{,}086 \text{ мм}.$$

Приняв коэффициент формы зерна $\alpha = 0{,}6$, получим

$$n_0 = \frac{3 \cdot 100}{200\pi} \frac{1}{0{,}6^{3/2} \cdot 0{,}086^2} \approx 140.$$

Фактическое количество вершинок зерен (n) в объеме рабочего слоя, расположенном над единицей поверхности связки. На поверхности связки всегда находится зерен меньше номинального (n_0), так как при правке круга или в процессе шлифования часть зерен, заделанных недостаточно глубоко, выкрашивается. Расчеты [81] показывают, что

$$n = n_0(1 - \varepsilon), \tag{2.21}$$

где ε — относительная критическая глубина заделки зерен, т. е. отношение глубины заделки зерна h к его размеру x (см. рис. 2.12), при котором зерно выкрашивается.

Решения сложной задачи об устойчивости зерен и, следовательно, об определении критической глубины заделки ε с учетом влияния всех факторов пока не найдено. На рис. 2.14 приведены результаты расчета ε, выполненные для торцового шлифования пластин твердого сплава ВК6 и стали 45 алмазными кругами АЧК 125×10 на металлической связке МО13 при различных режимах, зернистости и концентрации алмазов [85]. С увеличением поперечной подачи (сил резания) глубина заделки, при которой зерна выкрашиваются, увеличивается. При обработке стали 45 из связки выкрашиваются зерна с более глубокой заделкой, чем при обработке сплава ВК6 (следовательно, и расход алмазов в первом случае больше). При обработке твердого сплава в условиях эксперимента кривая $\varepsilon = f(\bar{x})$ имеет минимум, что может служить одной из причин экстремального характера кривых удельного расхода алмазов при различных зернистостях. Для обработки стали получена только левая ветвь кривой $\varepsilon = f(\bar{x})$, свидетельствующая о том, что в отличие от шлифования твердых сплавов в пределах изученных зернистостей круги с зернами больших размеров должны работать при шлифовании сталей более экономично.

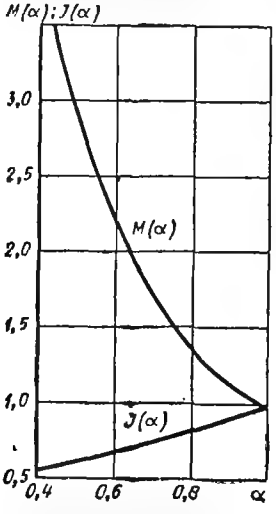


Рис. 2.13. Графики функций $M(\alpha)$, $J(\alpha)$

Увеличение концентрации алмазов, снижающее удельную нагрузку на зерно, приводит к повышению устойчивости последних (снижение ε). Значение ε в различных условиях можно получать экспериментальным путем, сопоставляя количество зерен n, видимых на рабочей поверхности круга, с номинальным значением n_0, рассчитанным по формуле (2.21), имея в виду, что $\varepsilon = 1 - \frac{n}{n_0}$.

В табл. 2.43 приведены значения ε, полученные путем подсчета количества видимых зерен n на эльборовых кругах с органической связкой Б1 и керамической связкой С10 и расчета по формуле (2.21).

Возможен и другой способ экспериментального определения ε. Измерив наибольший вылет зерен в круге (например, путем профилографирования

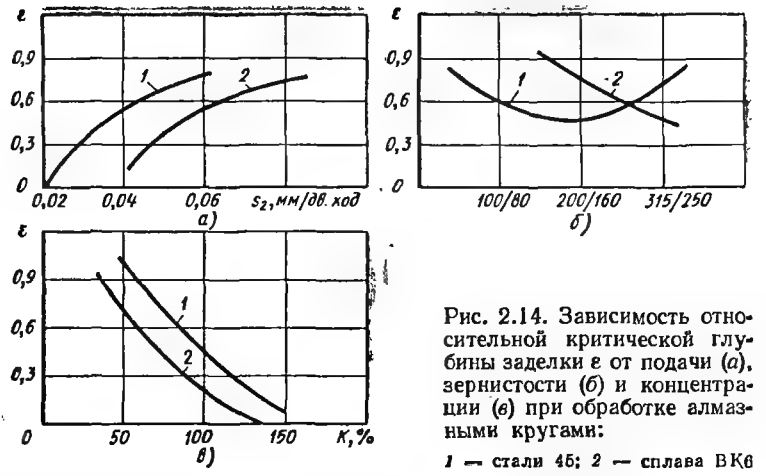


Рис. 2.14. Зависимость относительной критической глубины заделки ε от подачи (*а*), зернистости (*б*) и концентрации (*в*) при обработке алмазными кругами:

1 — стали 45; *2* — сплава ВК6

рабочей поверхности), для круга данной зернистости можем, пользуясь формулой (2.15), рассчитать

$$\varepsilon = 1 - \frac{\Delta_{max}}{\bar{x} + 3\sigma}.$$

Количество активных (работающих) зерен n_p. Не все из зерен, видимых на поверхности круга, участвуют в удалении обрабатываемого материала. Работают только те зерна (рис. 2.15), которые в данный момент времени имеют ординату Δ, отсчитываемую от наружной поверхности круга, меньшую, чем ордината Δ_1 случайной неровности на поверхности контакта, возникающей в результате прохода предыдущих зерен. Таким образом, условием для участия данного зерна в работе является положительное значение случайной величины $\eta = \Delta_1 - \Delta$. При $0 < \eta \leq t$ имеет место взаимодействие зерна с обрабатываемым материалом; при $\eta = 0$ зерно скользит по неровности детали; при $\eta < 0$ зерно в работе не участвует.

Таблица 2.43

Значения коэффициентов ε для эльборовых кругов на органической и керамической связках

Связка	Концентрация *K*, %	Зернистость	ε
Б1	100	63/50	0,85
		80/63	0,84
		100/80	0,78
		100/125	0,75
		160/125	0,74
	50	63/50	0,84
	100		0,85
	150		0,86
	200		0,88
	250		0,88
С10	100	40/28	0,93
		63/50	0,9
		125/100	0,81

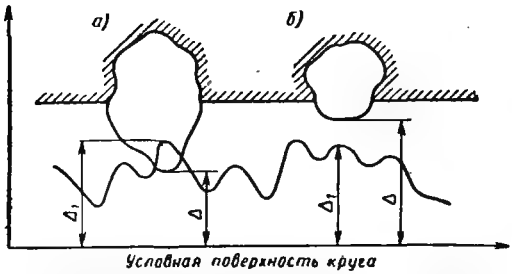


Рис. 2.15. Взаимодействие случайной поверхности круга со случайной поверхностью детали:

а — верно работает ($\eta > 0$); *б* — верно не работает ($\eta < 0$)

Для этой схемы вероятностным путем можно получить формулу

$$n_р = \beta^* nF(\nu), \quad (2.22)$$

где $F(\nu)$ — функция, зависящая от безразмерного параметра.

$$\nu = \frac{1000v}{w} n\sigma_0^2 \operatorname{tg} \gamma. \quad (2.23)$$

В формулах (2.22) и (2.23) n — фактическое количество зерен на рабочей поверхности круга, зерен/мм²; σ_0 — среднее квадратичное отклонение, характеризующее закон распределения вылета вершинок из связки; γ — половина средневероятного значения угла режущей вершинки зерна; v — скорость шлифования.

Средняя удельная производительность процесса шлифования, выраженная через съем материала с единицы поверхности контакта между кругом и деталью,

$$w = \frac{G}{F},$$

и ее конкретные значения зависят от схемы, кинематики и элементов режима резания (табл. 2.44).

Таблица 2.44

Формулы для расчета удельной производительности w с единицы площади поверхности контакта между кругом и деталью

Принятые обозначения: v_1 — скорость детали, м/мин; t — глубина шлифования, мм; s_1 — осевая подача, мм/мин; s_2 — поперечная подача, мм/мин; w — удельная производительность, мм/с

Вид шлифования	Характерный размер инструмента или детали	Формула
Ленточное	h — слой материала, снимаемый за время τ, мм	$w = \frac{h}{\tau}$
Плоское: торцом круга	B — ширина обода круга, мм	$w = \frac{1000}{60} \frac{v_1 t}{B}$
периферией круга	D — диаметр круга, мм	$w = \frac{1000}{60} v_1 \sqrt{\frac{t}{D}}$
Круглое врезное с непрерывной поперечной подачей	d — диаметр детали, мм	$w = \sqrt{\frac{1000}{60} v_1 s_2 \left(\frac{d}{D} \pm 1\right)}$

Примечание. При наружном шлифовании — знак плюс, при внутреннем — минус.

В формулу (2.22) входит также поправка β^* на несимметричное расположение кривой распределения вылетов вершинок зерен в рабочем слое круга, значения которых приведены ниже.

Относительное смещение кривой b	0	0,05	0,10	0,15	0,20
β^*	1,0	1,23	1,45	1,68	1,77

В пределах $1 \leqslant \nu \leqslant 100$ значения $F(\nu)$ аппроксимируются выражением $F(\nu) \approx \frac{0,55}{\sqrt{\nu}}$.

Тогда

$$n_p = \frac{0,55\beta^* \sqrt{n}}{\sigma_0 \sqrt{\operatorname{tg}\gamma}} \sqrt{\frac{w}{1000v}} \tag{2.24}$$

или

$$n_p \simeq 0,167 \frac{\beta^*}{\alpha^{3/4} \sqrt{\operatorname{tg}\gamma}} \frac{\sqrt{K}}{\bar{x}^2 \sqrt{1-\varepsilon}} \sqrt{\frac{w}{1000v}}. \tag{2.25}$$

В формулах (2.24) и (2.25) учтены выражения (2.16), (2.20), (2.21) и (2.23).

Пример. Рассчитать число работающих зерен при плоском шлифовании детали периферией круга вернистостью 100/80 ($\bar{x} = 0,086$). $D = 200$ мм; $K = 100\%$; режим: $v = 23$ м/с; $v_1 = 4$ м/мин; $t = 0,01$ мм. Материал режущих зерен — эльбор, связка Б1.

По табл. 2.43 находим $\varepsilon = 0,78$. Удельная производительность с 1 мм² поверхности контакта

$$w = \frac{1000 \cdot 4}{60} \sqrt{\frac{0,01}{200}} \approx 0,47 \text{ мм/с}.$$

При $\alpha = 0,6$; $\beta^* = 1,63$; $2\gamma = 80°$ по формуле (2.25) находим

$$n_p = 0,167 \frac{1,63}{0,6^{3/4} \sqrt{\operatorname{tg} 40°}} \frac{\sqrt{100}}{0,086^2 \sqrt{1-0,78}} \sqrt{\frac{0,47}{1000 \cdot 23}} \approx 6,6 \text{ зерен/мм}^2.$$

Количество активных зерен при шлифовании может быть определено экспериментальным путем. Наиболее достоверные данные могут быть получены при использовании устройств, позволяющих с большой скоростью отрывать шлифуемый образец от круга и рассматривать поверхность контакта со следами работы режущих зерен. На рис. 2.16 показана конструкция такого устройства, разработанного в Тольяттинском политехническом институте [87]. Корпус *1* закрепляют на столе шлифовального станка. Взрывную камеру *2* закрывают с одной стороны специальной гайкой *3* с запальным устройством. Взрыв происходит при включении электрического запальника, смонтированного в гайке *3*, в отверстие которой вставляют конус *4* из огнестойкого материала с отверстием для запального электрода *5*. К острию запального электрода и торца гайки припаяна копелевая проволочка диаметром 0,05—0,1 мм. Напряжение 30 В подводится к корпусу устройства и электроду *5*. При замыкании цепи копелевая проволочка воспламеняет дымный порох *6*, помещенный в углубление гайки *3*. Дымный порох массой 0,1 г используется в качестве детонатора для основного заряда *7* из бездымного пороха. Боек *8* при взрыве под действием пороховых газов перемещается по стволу камеры и ударяет по рычагу *9*, на торце которого закреплен шлифуемый образец *10*. В результате удара рычаг с образцом поворачивается вокруг оси *11*. Преграда *12* с амортизатором из резины *13* гасит скорость перемещения рычага. Для предохранения от возврата образца в зону шлифования имеются две защелки *14* из закаленной стали 65Г. Боек *8* задерживается в уловителе *15*. Опыт показал, что сила зажима рычага при плотной посадке в уловителе гарантирует от перемещения, возникающего под действием сил шлифования. Рычаг *9* изготовляют из титанового сплава или другого материала, имеющего высокую прочность при малой массе. Рычаги из других материалов под действием инерционных нагрузок в момент удара разрушаются. Для предотвращения значительных деформаций в месте удара бойка поставлена серьга *16*.

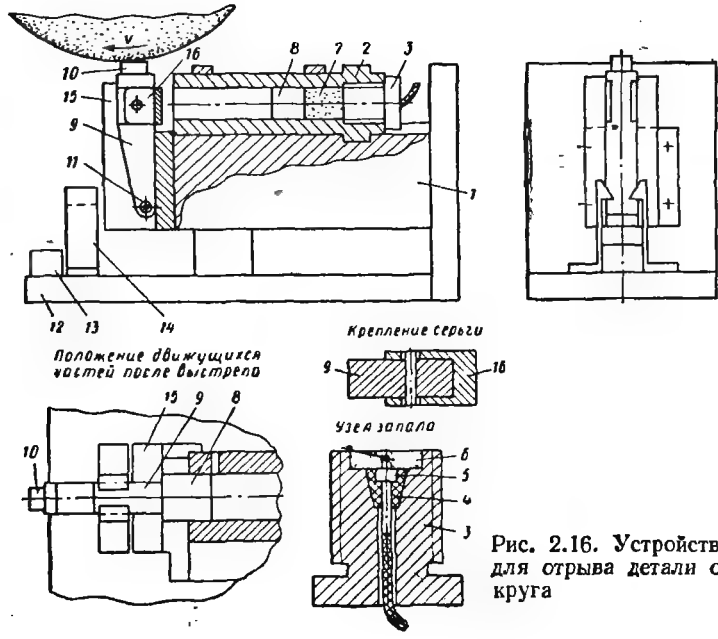


Рис. 2.16. Устройство для отрыва детали от круга

На рис. 2.17 приведены фотографии поверхностей шлифования при обработке закаленной стали 45 эльборовым (*а*) и абразивным (*б*) кругами.

Определение количества активных зерен выполняют и другими способами: прокаткой круга по стеклу с нанесением на последнее слоя краски, прокаткой круга по тонкой фольге, положенной на твердое основание, регистрацией импульсов от термопар, заложенных в деталь, и др. Наиболее близкий результат к количеству активных зерен, подсчитанных непосредственно по мгновенной поверх-

Рис. 2.17. Контактные поверхности при шлифовании стали 45

(v = 35 м/с; v_1 = 4 м/мин; t = 0,01 мм/дв. ход): *а* — эльборовым кругом — ЛО125/100 Б1 100%; *б* — абразивным кругом 23А16М3К7

ности шлифования, дает метод прокатки по фольге, толщина которой должна быть равна глубине резания t, при которой круг должен работать в дальнейшем.

Толщина среза, приходящаяся на одно режущее зерно. Расчет толщины среза приходящейся на одно зерно, ряд авторов выполняют исходя из геометрических соображений. Так, Е. Н. Маслов [55] для расчета наибольшей толщины среза, приходящейся на зерно, при круглом шлифовании предложил формулу

$$a_{max} = \frac{2v_1\sqrt{t}}{60vm}\sqrt{\frac{1}{D}+\frac{1}{d}}\,\frac{s_1}{B},$$

где m — число зерен на единицу длины круга; D и d — соответственно диаметры круга и детали; s_1 — продольная подача; B — ширина круга.

Г. Б. Лурье [53] для расчета толщины среза предложил формулу

$$a_{ср} \approx 0{,}8\sqrt{\frac{Q}{vn_p}}\sqrt{\frac{D+d}{Dd}},$$

где Q — удельный съем металла на 1 мм высоты круга, мм³/мм.

Анализируя процесс шлифования с помощью теоретико-вероятностных методов, можно получить формулу для расчета средней толщины среза, приходящейся на одно зерно:

$$a \approx \frac{0{,}11\sigma_0}{\nu^{0,25}}, \qquad (2.26)$$

где σ_0 и ν определяют из выражений (2.16) и (2.23).

Формула (2.26) может быть приведена к виду

$$a \approx 2\cdot 10^8\,\frac{\alpha^{0,37}}{(\operatorname{tg}\gamma)^{0,25}}\,\frac{(1-\varepsilon)^{0,25}\bar{x}}{K^{0,25}}\left(\frac{w}{1000v}\right)^{0,25}\text{мкм}. \qquad (2.27)$$

Пример. При условиях предыдущего примера рассчитать средневероятную толщину среза

По формуле (2.27)

$$a \approx 2\cdot 10^8\,\frac{0{,}6^{0,37}}{(\operatorname{tg}40^\circ)^{0,25}}\,\frac{(1-0{,}78)^{0,25}\,0{,}086}{100^{0,25}}\left(\frac{0{,}47}{1000\cdot 23}\right)^{0,25} \approx 2{,}1\ \text{мкм}.$$

§ 2.5. Силы резания, мощность и температура при шлифовании

Аппаратура для измерения сил резания. Современные средства для измерения сил, возникающих при шлифовании, как правило, содержат тензометрические датчики, что позволяет придать динамометрам необходимую жесткость и чувствительность. Для измерения сил, возникающих при плоском шлифовании, наиболее удобным является динамометр конструкции ВНИИ мод. УДМ-100. Для измерения сил при круглом наружном шлифовании используют динамометрические центры (рис. 2.18). Обрабатываемую деталь закрепляют на жесткой оправке в неподвижных центрах — переднем (обычном) и заднем (измерительном) и измеряют окружную составляющую силы шлифования P_z и радиальную P_y. Деформация измерительного центра воспринимается восемью датчиками сопротивлением 200 Ом с базой 10 мм. Схема включения датчиков показана на рис. 2.18.

При шлифовании длинных деталей следует оба центра делать измерительными. Продольное перемещение круга вызывает изменение сил, действующих на каждый из центров. Одновременное измерение и суммирование сил, приходящихся на каждый из центров, делает результат измерения не зависящим от положения круга.

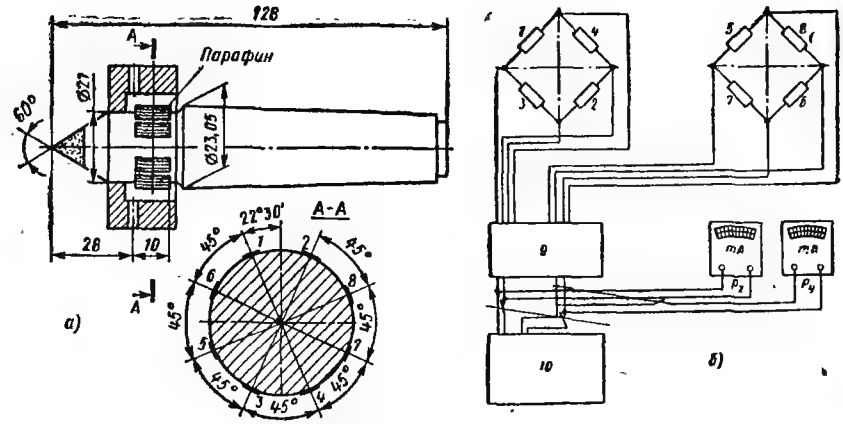


Рис. 2.18. Динамометрический центр для измерения сил при круглом наружном шлифовании:

а — общий вид; *б* — электрическая схема; *1—8* — тензодатчики; *9* — усилитель; *10* — осциллограф

Для измерения сил при внутреннем шлифовании можно применять устройство, приведенное на рис. 2.19 [52]. На корпусе шлифовального шпинделя или электрошпинделя *4* закреплено кольцо *3*, в котором расположен корпус виброгенераторного датчика. Вибрирующий щуп *1* датчика касается удлинителя *2* непосредственно у шлифовального круга в точке *B* (или *C*), лежащей в плоскости измеряемой деформации, пропорциональной силе P_z или P_y. Электромагнит, питаемый перемен-

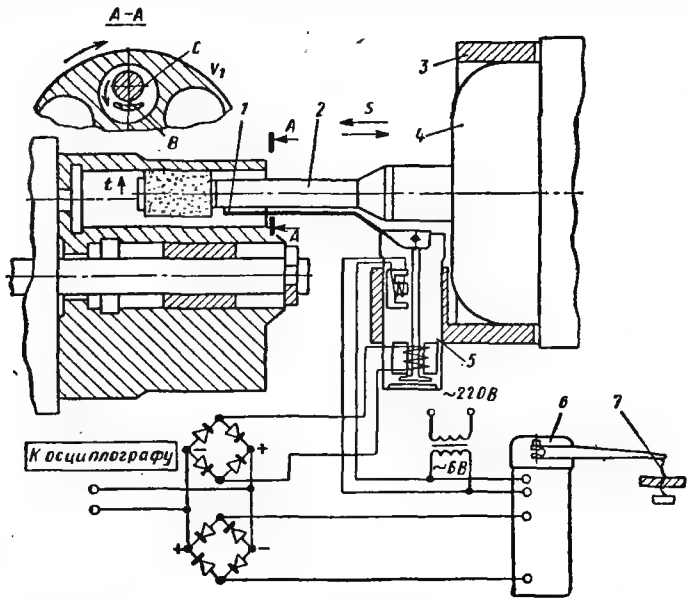


Рис. 2.19. Динамометр для измерения сил при внутреннем шлифовании

ным током, раскачивает щуп с частотой 100 Гц. Сила контакта щупа с поверхностью удлинителя не превышает 3 гс, а время контакта 10^{-3} с. Такие условия обеспечивают длительную работу щупа без заметного износа.

Силы резания могут быть измерены одним датчиком, однако удобнее применять компенсационный метод, когда, кроме измеряющего датчика *5*, в схему включают второй датчик *6* с аналогичной характеристикой. При этом амплитуда колебаний первого датчика ограничена поверхностью удлинителя *2*, а амплитуда компенсационного датчика — микрометрическим винтом *7*. Напряжение, генерируемое измеряющим датчиком, постоянно сравнивается с напряжением, поступающим от компенсационного датчика. Сила резания пропорциональна разности этих напряжений. Такая схема включения позволяет производить дистанционную электрическую поднастройку измерительного устройства, закрепленного на шлифовальном шпинделе, без остановки станка.

Силы резания и мощность при шлифовании. Формулы для определения сил резания и мощности при шлифовании приведены в табл. 2.45—2.59.

Поправочные коэффициенты K_1 и K_2 к формулам табл. 2.51 приведены ниже

Связка	М1	МК	Б1	ТО2
K_1	2,2	1,7	1,0	0,65
Зернистость	50/40	100/80	125/100	200/160
K_2	1,8	1,1	1,0	1,4

Температура в процессе шлифования. Для характеристики процесса шлифования представляют интерес средняя температура на поверхности контакта режущего зерна с деталью и температура на поверхности детали.

Средняя температура на поверхности контакта режущего зерна с деталью характеризует напряженность процесса шлифования и влияет на интенсивность износа круга и качество поверхности детали. Экспериментальное определение температуры на режущих зернах представляет значительные трудности. Теплофизический анализ позволяет получить формулу для расчета средней температуры на режущих зернах круга:

$$\theta_з = 10{,}7\,\frac{A^*}{\lambda_1 + 2{,}25\lambda A^* \sqrt{\mathrm{Fo}}}\,\frac{\delta P_z \sqrt{\omega_1 v}}{x_п^2 n_р B \sqrt{b}},$$

где λ_1 и λ_2 — соответственно коэффициенты теплопроводности обрабатываемого материала и режущего зерна, кал/см·см·с·град; δ — коэффициент, учитывающий неравномерное распределение нагрузки между зернами на площадке контакта в связи с неравномерным распределением удельных сил ($\delta = 1{,}5 \div 2{,}0$); P_z — окружная составляющая шлифования, кгс; v — скорость шлифования, м/с; $x_п = 0{,}875\bar{x}\sqrt[3]{\alpha}$ — приведенный размер зерен в круге, зависящий от наиболее вероятного размера $\bar{x}$ и коэффициента α, характеризующего форму зерна (см. с. 113); $n_р$ — вероятное количество режущих зерен на мм² рабочей поверхности круга (см. с. 28); B, b — размеры контактной площадки круга с деталью, мм.

Функция A^* зависит от соотношения между коэффициентом теплопроводности режущего зерна λ_1 и средним коэффициентом теплопроводности круга $\lambda_к$, а также от времени контакта зерна с деталью при одном резе $\tau_к$. Последнее представлено через безразмерный комплекс Фурье

$$\mathrm{Fo} = \frac{100\omega_1\tau_к}{x_п^2} = \frac{\omega_1 b}{10 v x_п^2}, \qquad (2.28)$$

где ω_1 — коэффициент температуропроводности зерна, см²/с.

Таблица 2.45

Формулы, коэффициенты и показатели степени для расчета сил резания при плоском торцовом шлифовании твердых сплавов чашечными алмазными кругами

$$P_y = C_{py} t^{x_{py}} v_1^{y_{py}} v^{z_{py}} F^{m_{py}} \prod_{i=1}^{m} K_{yi};$$

$$P_z = C_{pz} t^{x_{pz}} v_1^{y_{pz}} v^{z_{pz}} F^{m_{pz}} \prod_{i=1}^{m} K_{zi},$$

где t — глубина шлифования, мм; v_1 — скорость детали, м/мин; v — скорость круга, м/с; F — площадь контакта круга с деталью, мм²; $\prod_{i=1}^{m} K_i$ — произведение поправочных коэффициентов на измененные условия работы

Коэффициент и показатели степени	Связка круга						
	Органическая			Металлическая			Керамическая
	Б1	Б156	ТО2	ТМ	МВ1	МО13	К1
C_{py}	3,00	1,70	2,30	15,6	44,0	37,5	21,0
x_{py}	0,68	0,72	0,60	0,78	0,88	0,58	0,70
y_{py}	0,57	0,49	0,57	0,60	0,60	0,56	0,77
z_{py}	−0,73	−0,71	−0,82	−0,82	−0,83	−0,84	−0,81
m_{py}	1,12	1,24	1,18	0,89	0,87	0,83	0,75
C_{pz}	0,60	0,41	0,20	1,60	1,60	1,48	1,40
x_{pz}	0,69	0,81	0,57	0,85	0,71	0,46	0,98
y_{pz}	0,61	0,70	0,60	0,72	0,60	0,44	0,72
z_{pz}	−0,59	−0,66	−0,82	−0,70	−0,71	−0,60	−0,60
m_{pz}	1,18	1,28	1,31	1,10	1,15	0,97	1,13

Таблица 2.46

Поправочные коэффициенты на марку алмаза K_{y1} и K_{z1} к формулам табл. 2.45

Марка алмаза	Коэффициент	Связка круга						
		Б1	Б156	ТО2	ТМ	МВ1	МО13	К1
А	K_{y1}	1,38	1,60	1,62	—	1,77	—	—
	K_{z1}	1,26	1,45	1,40	—	1,71	—	—
АСР	K_{y1}	1,1	1,27	1,23	1,34	1,27	1,24	1,17
	K_{z1}	1,04	1,17	1,18	1,26	1,32	1,31	1,21
АСВ	K_{y1}	1,13	1,56	1,35	1,31	1,34	1,39	1,23
	K_{z1}	1,07	1,47	1,42	1,28	1,36	1,35	1,31

Примечание. Для алмазов АСО со всеми указанными связками поправочные коэффициенты $K_{y1} = 1$ и $K_{z1} = 1$.

Таблица 2.47

Поправочные коэффициенты на зернистость кругов K_{y2} и K_{z2} к формулам табл. 2.45

Зернистость	Коэффициент	Связка круга						
		Б1	Б156	ТО2	ТМ	МВ1	МО13	К1
50/40	K_{y2}	1,62	—	—	—	1,26	—	—
	K_{z2}	1,45	—	—	—	1,22	—	—
63/50	K_{y2}	1,07	1,12	1,17	1,18	1,21	—	1,16
	K_{z2}	1,10	1,16	1,20	1,20	1,17	—	1,23
80/63	K_{y2}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	K_{z2}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
100/80	K_{y2}	0,97	0,94	0,96	0,98	1,25	—	0,93
	K_{z2}	0,96	0,97	0,99	1,13	1,12	—	0,99
125/100	K_{y2}	0,95	0,85	0,89	1,15	1,28	—	1,10
	K_{z2}	0,97	0,97	0,95	1,21	1,20	—	1,13
200/160	K_{y2}	1,48	—	—	—	1,32	—	—
	K_{z2}	1,32	—	—	—	1,20	—	—

Таблица 2.48

Поправочные коэффициенты на концентрацию алмазов K_{y3} и K_{z3} к формулам табл. 2.45

Концентрация, %	Коэффициент		Концентрация, %	Коэффициент	
	K_{y3}	K_{z3}		K_{y3}	K_{z3}
50	1,23	1,35	150	0,85	0,84
100	1,00	1,00	200	0,82	0,78

Таблица 2.49

Поправочные коэффициенты на охлаждение K_{y4} и K_{z4} к формулам табл. 2.45

Охлаждение	Коэффициент	Связка круга						
		Б1	Б156	ТО2	ТМ	МВ1	МО13	К1
Водный раствор	K_{y4}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
	K_{z4}	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Без охлаждения	K_{y4}	1,08	1,04	1,12	1,97	1,71	1,6	1,2
	K_{z4}	1,24	1,06	1,16	4,30	2,40	1,85	1,5

Таблица 2.50

Поправочные коэффициенты на марку обрабатываемого твердого сплава K_{y5} и K_{z5} к формулам табл. 2.45

Марка сплава	Связка круга			
	Органическая		Металлическая	
	K_{y5}	K_{z5}	K_{y5}	K_{z5}
ВК6	0,98	0,95	0,91	0,93
ВК8	1,0	1,0	1,0	1,0
ВК20	—	1,20	—	—
Т5К10	1,81	1,10	0,92	0,96
Т14К8	0,73	0,98	—	—
Т15К6	—	0,50	0,64	0,66
Т30К4	—	—	0,42	0,40

Таблица 2.51

Формулы для расчета сил резания при шлифовании твердых сплавов периферией алмазных кругов

(t — глубина шлифования, мм; v_1 — скорость детали, м/мин; v — скорость круга, м/с; s — осевая подача, мм/мин; d — диаметр детали мм; P — шаг резьбы, мм; r — радиус скругления вершины профиля резьбового круга, мм)

Вид шлифования	Характеристика круга	Марка сплава и размеры обрабатываемой поверхности	Режим резания	Формула	
Плоское с охлаждением	АПП 200×10 А50/40М1 100%	ВК20 59×47 мм²	$t = 0{,}02 \div 0{,}08$; $V_1 = 3{,}5 \div 7{,}5$; $V = 30$ $s_1 = 300 \div 1000$	$P_z = 0{,}127 t^{0{,}8} v_1^{0{,}6} s_1^{0{,}9}$	[78]
Круглое наружное с охлаждением	АПП 200×20 АСВ 125/100М5 200%	ВК	$t = 0{,}005 \div 0{,}02$ $V_1 = 25$ $v = 20 \div 40$ $s_1 = 500 — 1500$	$P_z = 0{,}37 t s_1^{0{,}9} d^{0{,}62} K_1 K_2 K_3$ $P_y = 0{,}6 t^{1{,}25} s_1 d^{0{,}78} K_1 K_2 K_3$	[104]
Шлифование резьбы без предварительной обработки с охлаждением маслом	АСП 125/100М1 150%	ВК6 $P = 1 \div 4$ $d = 10 \div 45$	$t = 0{,}01 \div 0{,}5$ $v_1 = 0{,}2 \div 1{,}8$ $v = 26 \div 42$	$P_z = 32{,}8 t^{0{,}65} v_1^{0{,}62} v^{-1{,}08} d^{0{,}65} r^{0{,}34} P$ $P_y = 38{,}2 t^{0{,}57} v_1^{0{,}46} v^{-1{,}08} d^{0{,}74} r^{0{,}34} P$	[93]

Таблица 2.52

Поправочный коэффициент K_3 к формулам табл. 2.51

Концентрация, %	K_3 для связки		Концентрация, %	K_3 для связки	
	металлической	органической		металлической	органической
50	—	1,3	150	1,3	0,9
100	2,2	1,0	200	1,0	—

Таблица 2.53

Формулы, коэффициенты и показатели степени для расчета сил резания при плоском шлифовании быстрорежущих сталей чашечными кругами из эльбора [41]

$$P_y = C_{py} t^{x_{py}} v_1^{y_{py}} v^{z_{py}} K_{y1} K_{y2};$$

$$P_z = C_{pz} t^{x_{pz}} v_1^{y_{pz}} v^{z_{pz}} K_{z1} K_{z2}$$

Круг ЧК 125×10; F = 18×6 мм; без охлаждения

Материал обрабатываемой детали	C_{py}	x_{py}	y_{py}	z_{py}	C_{pz}	x_{pz}	y_{pz}	z_{pz}
Р18, Р18Ф2, Р14Ф4	10 800	0,95	0,5	—1,3	1360	0,62	0,7	—1,4
Р10К5Ф5	10 150	1,06	0,77	—1,2	910	0,52	0,68	—1,3

Таблица 2.54

Поправочные коэффициенты для учета влияния зернистости эльбора к формуле табл. 2.53

Зернистость	K_{y1}	K_{z1}	K_{y1}	K_{z1}
	при обработке Р18, Р18Ф2, Р14Ф4		при обработке Р10Ф5К5	
40/28	2,4	3,0	3,78	2,2
50/40	1,95	2,2	2,66	1,8
100/80	1	1	1	1
200/160	2,06	1,66	2,7	2,1
250/200	3,2	2,2	4,7	2,5

Таблица 2.55

Поправочные коэффициенты для учета влияния концентрации эльбора

Концентрация, %	K_{y2}	K_{z2}	K_{y2}	K_{z2}
	при обработке Р18, Р18Ф2, Р14Ф4		при обработке Р10Ф5К5	
50	1,38	1,65	1,45	1,35
100	1	1	1	1
150	1,24	2,6	1,17	1,8
200	2,1	3,3	1,95	2,7

Таблица 2.56

Формулы, коэффициенты и показатели степени для расчета сил резания и температуры θ при плоском торцовом шлифовании твердых сплавов кругами из карбида кремния зеленого [106]

$$P_z = C_{pz} t^{0,31} v_1^{0,3} v^{-0,5} BK_z;\quad P_y = C_{py} t^{0,31} v_1^{0,3} v^{-0,4} BK_y;\quad \theta = C_\theta t^{0,3} v_1^{-0,33} v^{0,7} K_\theta;\quad t = 0,02 \div 0,2 \text{ мм};\quad v_1 = 3 \div 8 \text{ мм};\quad v = 6 \div 20 \text{ м/с}$$

Зернистость	Связка круга	Твердость круга											
		СМ2			СМ1			М3			М2		
		C_{pz}	C_{py}	C_θ	C_{pz}	C_{py}	C_θ	C_{pz}	C_{py}	C_θ	C_{pz}	C_{py}	C_θ
25	К	0,125	0,271	142	0,104	0,226	118	0,075	0,190	85	0,063	0,136	71
	Б	0,094	0,202	108	0,078	0,170	88	0,056	0,142	63,5	0,047	0,102	53
40	К	0,108	0,242	120	0,09	0,203	100	0,065	0,170	72	0,054	0,122	60
	Б	0,086	0,195	96	0,072	0,163	80	0,052	0,137	57,5	0,042	0,10	48

Таблица 2.57

Поправочные коэффициенты к формуле табл. 2.56

Коэффициент	Твердый сплав							
	ВК2	ВК6	ВК6М	ВК8	Т30К4	Т14К8	Т15К6	Т5К10
K_z	1,57	1,23	0,95	0,81	0,85	1,02	1,0	1,32
K_y	1,65	1,15	0,92	0,95	0,98	1,05	1,0	1,27
K_θ	1,05	0,98	0,98	0,87	1,15	0,98	1,0	1,28

Таблица 2.58

Формулы, коэффициенты и показатели степени для расчета сил резания при круглом шлифовании абразивными кругами [106]

$$P_z = C_{pz} t^{x_{pz}} s^{n_{pz}}; \quad P_y = C_{py} t^{x_{py}} s^{n_{py}}$$

Круг ПП 400×32×203 24А25СМ1—СТ1К6; v_s = 10÷60 м/мин; v = 34 м/с; охлаждение — эмульсией

Материал обрабатываемой детали	C_{pz}	x_{pz}	n_{pz}	C_{py}	x_{py}	n_{py}
Сталь:						
45 незакаленная	0,22	0,60	0,73	0,18	0,76	0,93
45 закаленная	0,07	0,83	1,0	0,25	0,83	0,87
У8А	0,22	0,60	0,80	0,38	0,80	0,73
Р18	0,49	0,56	0,53	2,70	0,43	0,47
Р9Ф5	0,15	0,70	0,80	1,86	0,53	0,60
40Х13	0,18	0,70	0,86	0,19	0,76	1,13
09ГИ	0,09	0,80	1,00	0,13	0,87	1,06
20Х13	0,27	0,57	0,80	0,54	0,86	0,53
20Х23Н18	0,27	0,70	0,66	0,30	0,90	0,80
ЭИ992	0,42	0,76	0,33	0,67	0,86	0,54
ХН75ВМЮ	0,41	0,66	0,46	0,82	0,83	0,46
Бронза Бр.АЖМСЦ	0,01	0,80	1,30	0,17	0,70	0,80
Дюралюминий	0,40	0,63	1,23	0,13	0,60	1,10

Для определения значений $A^* = f\left(\mathrm{Fo};\ \frac{\lambda_1}{\lambda_к}\right)$ приведен график на рис. 2.20.

Температура на поверхности детали. Если расчет температуры, возникающей на отдельных зернах круга, нужен главным образом для оценки условий работы шлифовального инструмента, то определение температуры на шлифуемой поверхности представляет интерес для оценки теплового и напряженного состояния поверхностных слоев детали. Температура на поверхности детали может быть определена расчетным или экспериментальным методом. Расчетный метод показан ниже на примере плоского шлифования торцом круга.

Для плоского шлифования торцом круга можно принять, что распределение удельных сил и интенсивности теплообразования на площадке контакта описывается экспоненциальным законом (рис. 2.21)

$$q(x) = q_0 e^{-mx^2},$$

где $0 \leqslant x \leqslant B$ — абсцисса рассматриваемой точки, мм; q_0 — интенсивность теплообразования для периферийных участков круга, кал/см²·с; $m = 0{,}01 \div 0{,}03$ — темп снижения интенсивности теплообразования, зависящий от свойств круга и материала обрабатываемой детали, 1/мм².

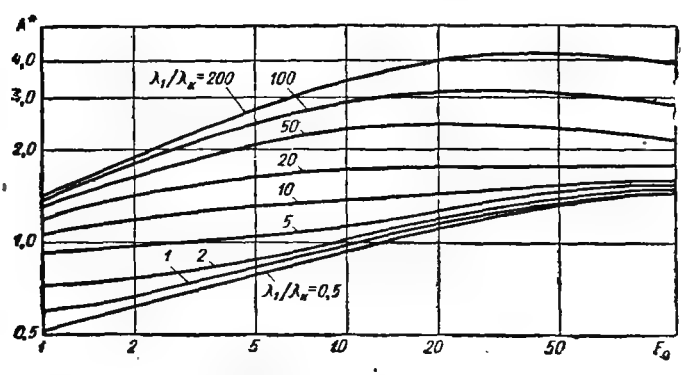


Рис. 2.20. График функции A^*

Формулы, коэффициенты и показатели степени для расчета эффективности мощности при шлифовании абразивными кругами [97]

Таблица 2.59

При *круглом шлифовании с продольной подачей* $N_э = C_N t^{x_N} v_1^{y_N} s^{z_N} d^{q_N}$, где d — диаметр шлифования, мм.

При круглом наружном врезном шлифовании $N_э = C_N v_1^{y_N} s^{z_N} d^{q_N} b^{p_N}$, где b — ширина шлифования, мм.

При шлифовании торцом круга $N_э = C_N t^{x_N} v_1^{y_N} b^{p_N}$.

Абразивный материал при обработке сталей — электрокорунд, при обработке чугуна — карборунд

Операция	Материал обрабатываемой детали	Шлифовальный круг		C_N	x_N	y_N	z_N	q_N	p_N
		Зернистость	Твердость						
Круглое шлифование: с поперечной подачей на двойной ход стола	Сталь закаленная	50—40	СМ1, СМ2	1,3	0,85	0,75	0,7	—	—
с поперечной подачей на каждый ход стола	Сталь незакаленная	50	СМ2	2,2	0,5	0,5	0,55	—	—
врезное	Сталь закаленная	40 50	СМ1—С1 С1	2,65 0,14	0,5 0,8	0,5 0,8	0,55 —	— 0,2	— 1,0
Круглое внутреннее шлифование	Сталь незакаленная	40	С1	0,27	0,4	0,5	0,4	0,3	—
	Сталь закаленная	50—40 25	СМ1—С1 СМ1	0,36 0,3	0,4 0,4	0,35 0,35	0,4 0,4	0,3 0,3	— —
	Чугун	40	СМ1	0,81	1,0	0,55	0,7	0,5	—
Круглое бесцентровое шлифование: на проход	Сталь незакаленная	40—25 25	С1—СТ1 СМ2	0,1 0,075	0,6 0,6	0,85 0,85	0,7 0,7	0,5 0,5	— —

Операция	Материал обрабатываемой детали	Шлифовальный круг		C_N	x_N	y_N	z_N	q_N	p_N
		Зернистость	Твердость						
Круглое внутреннее шлифование: на проход	Сталь закаленная	40	СМ1—С1	0,28	0,6	0,6	0,5	0,5	—
		25	СМ1—С1	0,34	0,6	0,6	0,5	0,5	—
врезное	Сталь закаленная и незакаленная	40	СМ1—С1	0,07	0,65	0,65	—	0,5	1,0
Плоское шлифование периферией круга: на станках с прямоугольным столом	Сталь незакаленная	50	СМ2	0,52	0,8	1,0	0,8	—	—
			С1	0,59	0,8	1,0	0,8	—	—
			СТ2	0,68	0,8	1,0	0,8	—	—
на станках с круглым столом	Сталь закаленная	50—40	М3—С1	0,53	0,65	0,8	0,7	—	—
			М3—СМ1	0,7	0,5	0,7	0,5	—	—
Плоское шлифование торцом круга: на станках с прямоугольным столом	Сталь незакаленная	125	М2 *	0,17	0,5	0,7	—	—	0,6
			С1 *	0,39	0,5	0,7	—	—	0,6
			СТ1 *	0,59	0,5	0,7	—	—	0,6
		80—50	М1—СМ2 *	1,9	0,5	0,5	—	—	0,6
		50	М3 *	1,31	0,5	0,5	—	—	0,6
на станках с круглым столом	Сталь закаленная	80—50	М1—СМ2 **	5,2	0,25	0,3	—	—	0,3
		50	М3 ***	3,8	0,4	0,4	—	—	0,45
	Чугун	50	СМ1—СМ2 **	4,0	0,4	0,4	—	—	0,45
			СМ2 ***	2,6	0,4	0,4	—	—	0,45

Примечания: 1. Связка кругов керамическая, за исключением кругов, отмеченных знаком *, у которых связка бакелитовая. 2. Знаком ** отмечены кольцевые круги, а знаком *** — сегментные.

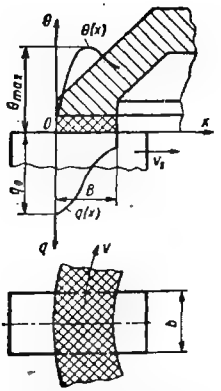


Рис. 2.21. Схема процесса плоского шлифования торцом круга с иллюстрацией законов распределения интенсивности тепловых потоков $q(x)$ и температур $\theta(x)$

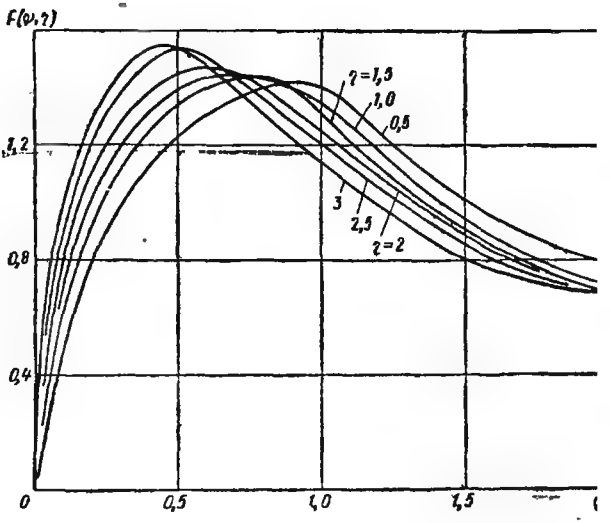


Рис. 2.22. График функции $F(\psi, \eta)$

Тогда закон распределения температур на поверхности детали в подвижной системе координат, связанной с кругом, будет

$$\Theta(x) = 36{,}5\,(1 - b^*)\,\frac{\sqrt{\omega}}{\lambda}\,\frac{P_z v}{b\sqrt{v_1 B}}\,F(\psi;\ \eta), \qquad (2.29)$$

где b^* — коэффициент, характеризующий относительное распределение теплоты шлифования между кругом и деталью; λ и ω — коэффициенты теплопроводности обрабатываемого материала, кал/см · с · град; ω — коэффициент температуропроводности, см²/с; P_z — тангенциальная сила при шлифовании, кгс; v — скорость круга, м/с; b — ширина площадки контакта, мм; $F(\psi, \eta)$ — безразмерная функция распределения, зависящая от безразмерных критериев $\psi = \frac{x}{B}$, $\eta = mB^2$; v_1 — скорость детали, м/мин.

Как видно из графика функции $F(\psi, \eta)$, приведенного на рис. 2.22, температура на площадке контакта круга с деталью распределена неравномерно. Чем интенсивнее темп снижения теплообразования от периферии круга к центру m и чем шире обод инструмента B, тем ближе область с максимумом температуры к наружной поверхности круга, т. е. $F_{max}(\psi, \eta) \approx 1{,}43\eta^{0{,}05}$. Это значение можно использовать при необходимости по формуле (2.29) определить наибольшую температуру на поверхности контакта круга с деталью.

С учетом последнего выражения по формуле (2.29) получаем

$$\theta_{max} = 52\,(1 - b^*)\,\frac{\sqrt{\omega}}{\lambda}\,\frac{m^{0{,}05} P_z v}{b\sqrt{v_1}\,B^{0{,}4}}. \qquad (2.30)$$

Для определения доли тепла в детали $(1 - b^*)$ применяют формулу

$$b^* = \frac{1}{1 + 2{,}25\,\frac{\lambda}{\lambda_1}\,A^*\sqrt{\mathrm{Fo}}}. \qquad (2.31)$$

Пример. Рассчитать наибольшую температуру на поверхности пластины из сплава ВК8 ($\lambda = 0{,}13$ кал/см·с·град; $\omega = 0{,}83$ см²/с) при шлифовании торцом чашечного алмазного круга на связке Б1 ($\lambda_к \approx 0{,}002$ кал/см·с·град) зернистостью 83/60, концентрации $K = 100\%$. Режим резания $v = 20$ м/с; $v_1 = 2$ м/мин; $t = 0{,}02$ мм.

Размеры поверхности контакта $B \times b = 8 \times 12$ мм²; сила $P_z = 2{,}75$ кгс; $m = 0{,}02$.

По рис. 2.22 при

$$Fo = \frac{0{,}83 \cdot 12}{10 \cdot 25 \cdot 0{,}05^2} \approx 16 \left[\omega = 0{,}83 \text{ см}^2/\text{с};\ x_п = 0{,}875 \cdot 0{,}07 \sqrt[3]{0{,}6} \approx 0{,}05 \text{ мм (см. стр. 117)}\right] \text{ и}$$

$$\frac{\lambda_1}{\lambda_к} = \frac{0{,}35}{0{,}002} = 175 \text{ получаем } A^* = 3{,}67.$$

$$\text{Далее } b^* = \frac{1}{1 + 2{,}25 \dfrac{0{,}13}{0{,}35}\ 3{,}67 \cdot 16} \approx 0{,}08;$$

$$\theta_{max} = 52\,(1 - 0{,}08)\ \frac{\sqrt{0{,}83}}{0{,}13}\ \frac{0{,}02^{0{,}05} \cdot 2{,}75 \cdot 20}{12\sqrt{2} \cdot 8^{0{,}4}} = 390°.$$

Методы измерения температур. Для измерения температуры при шлифовании применяют главным образом искусственные или полуискусственные термопары. На рис. 2.23 приведены принципиальные схемы термопар, используемых для измерения температуры при шлифовании. Полуискусственную термопару (рис. 2.23, *а*) получают, когда проводник *П* из какого-либо материала (константана, стали, меди) прижимают к обрабатываемому материалу *М* снаружи или внутри полости или приваривают тем или иным способом. Для измерения температуры в различных точках детали может быть успешно применена защемленная полуискусственная термопара.

В зависимости от теплофизических свойств материала образца и принятых режимов шлифования чувствительный элемент термопары первоначально помещают на расстоянии 0,5—1,2 мм от шлифуемой поверхности *О*. В процессе шлифования поверхность обработки приближается к горячему спаю термопары, при этом термотоки, регистрируемые посредством осциллографа, соответствуют температурам глубинных слоев материала образца, находящихся на различном удалении от поверхности шлифования. После срезания головки электрода термопара автоматически начинает фиксировать поверхностную температуру, при этом горячий спай образуется на шлифуемой поверхности образца вследствие пластического течения материала проводника *П*.

Аналогично может быть изготовлена искусственная термопара (рис. 2.23, *б*) В этом случае обрабатываемый образец состоит из двух тщательно пришлифованных друг к другу частей *1* и *2*. В одной из них электроискровым способом делают углубление, где через тонкие пластинки изоляции *3* зажимают спай *С* двух проводников $П_1$ и $П_2$, изолированных друг от друга.

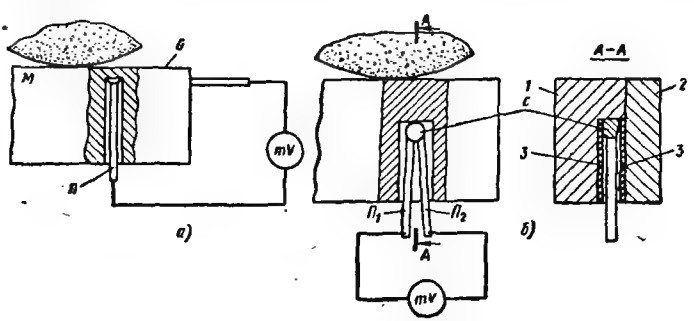


Рис. 2.23. Схемы термопар, применяемых для измерения температуры в процессе шлифования:

а — полуискусственная; *б* — искусственная (на левой проекции пластина *2* и изоляция *3* не показаны)

Таблица 2.60

Формула, коэффициенты и показатели степени для расчета температур при плоском алмазном шлифовании торцом круга

$$\theta = C_\theta t^{x_\theta} v_1^{y_\theta} v^{z_\theta} P^{m_\theta} \prod_{i=1}^{m} K_{\theta i}$$

Параметры, оказывающие влияние на θ	Коэффициенты и показатели степени	Связка алмазного круга						
		Органическая			Металлическая			Керамическая К1
		Б1	Б156	ТО2	ТМ	МВ1	МО13	
Обрабатываемый материал ВК8	C_θ	8,45	4,82	3,42	0,70	3,04	4,15	4,50
	x_θ	0,70	0,60	0,68	0,45	0,51	0,44	0,63
	y_θ	0,50	0,54	0,57	0,50	0,38	0,31	0,51
	z_θ	0,48	0,51	0,60	0,60	0,50	0,47	0,60
	m_θ	0,80	0,76	0,82	0,96	0,85	0,74	0,68
Охлаждение:	$K_{\theta 1}$							
с охлаждением		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
без охлаждения		2,75	1,48	1,46	2,7	2,65	2,0	2,6
Концентрация:	$K_{\theta 2}$							
50		1,5	1,65	1,7	1,7	1,34	—	1,2
100		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
150		0,81	0,9	0,94	1,5	1,26	—	1,3
200		0,62	0,8	0,91	1,6	1,40	—	0,9
Марка зерна:	$K_{\theta 3}$							
АСО		0,96	0,91	0,95	—	—	—	—
АСР		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
АСВ		1,0	1,0	1,0	—	1,3	1,0	—
Зернистость круга:	$K_{\theta 4}$							
АСО 63/50		1,34	1,2	1,18	1,6	1,4	—	1,5
АСО 80/63		1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
АСО 125/100		1,38	1,26	1,35	1,35	1,6	1,3	1,6
АСО 160/125		1,81	—	—	1,75	—	—	—

Температуры на поверхности детали при шлифовании, полученные экспериментальным путем, представляют в виде зависимости

$$\theta = C_\theta t^{x_\theta} v_1^{y_\theta} v^{z_\theta} \prod_{i=1}^{m} K_{\theta i}. \qquad (2.32)$$

Несколько формул такого типа приведены в табл. 2.60. Формулы типа (2.32), как правило, описывают температуру, близкую к максимальной (θ_{max}).

§ 2.6. Качество поверхностей при абразивном и алмазном шлифовании

Надежность, долговечность и другие эксплуатационные свойства деталей машин в значительной степени зависят от качества обработанных поверхностей. Под качеством поверхности подразумевают весь комплекс параметров, определяющих точность обработки, геометрическую форму и физико-механические свой-

Таблица 2.61

Доля отдельных источников погрешностей в общем балансе точности шлифованных поверхностей

Основные источники погрешности	Характер влияния источника погрешности на точность	Погрешность по отношению к величине допуска, %
Неточность установки инструмента	Прямое	10—60
Деформации:		
силовые	Косвенное в зависимости от жесткости СПИД	10—70
тепловые	Прямое	5—60
за счет внутренних напряжений	»	До 50
Погрешности изменений	»	10—15
Износ инструмента	»	До 30
Колебания температуры в помещении	Прямое и косвенное	» 25
Случайные причины	То же	» 20

ства, получаемые в результате обработки поверхности тем или иным технологическим способом.

Точность обработки. Точность обработки, представляющая собой степень приближения действительных размеров детали к ее номинальному размеру, по-разному зависит от первичных источников погрешностей. Из табл. 2.61 [53,] где приведена доля отдельных источников погрешностей в общем точностном балансе, видно, что наибольшее влияние на точность абразивной обработки оказывают силовые и температурные деформации, а также неточности установки шлифовального инструмента

Силы, возникающие при шлифовании, деформируют систему СПИД, в связи с чем фактический съем материала $t_ф$ оказывается меньше номинальной глубины шлифования t_0. Если не учитывать линейный износ инструмента (что правомерно делать при чистом шлифовании деталей абразивными и особенно алмазными и эльборовыми кругами), то разница $\Delta t = t_0 - t_ф$ будет в значительной мере обусловливать точность обработки. Величину Δt, которую принято называть недосъемом или потерей съема материала, можно представить в виде

$$\Delta t = K t_0,$$

где K — коэффициент потери съема, определяемый по формуле

$$K = \frac{t_0 - t_ф}{t_0}.$$

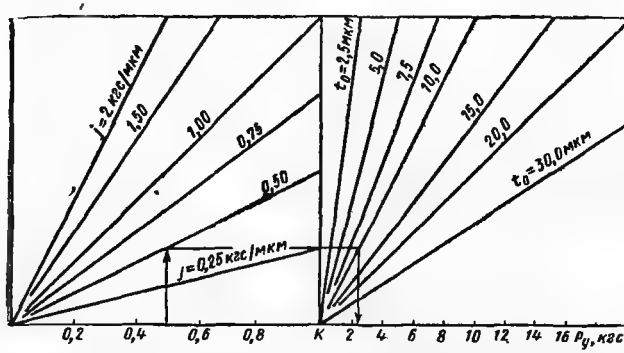


Рис. 2.24. Номограмма для определения допустимой величины P_y в зависимости от заданной точности обработки

Сила шлифования

$$P_y = j\,\Delta t = jKt_0,$$

где j — жесткость системы СПИД.

По номограмме, приведенной на рис. 2.24, по заданным значениям j, K и t_0 можно найти допустимые величины силы P_y. Погрешности Δt рассчитывают в зависимости от вида шлифования, способа закрепления детали и относительного положения шлифовального круга. Так, при круглом наружном шлифовании весьма жесткой детали ($j_д \to \infty$) в центре значение Δt рассчитывают [46] следующим образом:

$$\Delta t = P_y\left[\left(\frac{x}{l}\right)^2\frac{\lambda}{j_{п.б}} + \left(\frac{l-x}{l}\right)\frac{1}{j_{з.б}} + \frac{1}{j_{ш.б}}\right], \qquad (2.33)$$

где x — расстояние от торца детали, поджатого задним центром, до точки приложения силы P_y; l — длина шлифуемой детали; $j_{п.б}$, $j_{з.б}$, $j_{ш.б}$ — соответственно жесткости передней, задней и шлифовальной бабок станка.

При $x = 0{,}5l$ получаем

$$\Delta t = P_y\left[0{,}25\left(\frac{1}{j_{п.б}} + \frac{1}{j_{з.б}}\right) + \frac{1}{j_{ш.б}}\right]. \qquad (2.34)$$

Формулы (2.33) и (2.34) выведены для случая, когда $j_{п.б} > j_{з.б}$. При шлифовании нежестких деталей следует учитывать и величину $j_д$; тогда (при $x = 0{,}5l$) получаем следующее выражение:

$$\Delta t = P_y\left[0{,}25\left(\frac{1}{j_{п.б}} + \frac{1}{j_{з.б}}\right) + \frac{1}{j_{ш.б}} + \frac{1}{j_д}\right].$$

Величину $j_д$ рассчитывают по формуле

$$j_д = \frac{2{,}4d^4E}{l^3},$$

где d — диаметр шлифуемой детали; E — модуль упругости материала детали.

При внутреннем врезном шлифовании в связи с прогибом оправки круга значение Δt можно определить по формуле

$$\Delta t = \frac{P_y}{j_{о.п}}\left(\frac{l-x}{l}\right),$$

где $j_{о.п}$ — жесткость оправки; x — расстояние от переднего торца круга до точки приложения силы P_y.

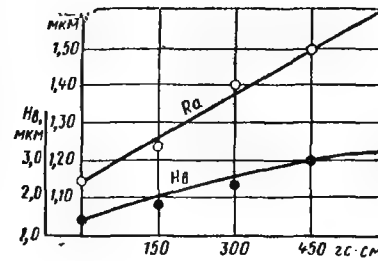
Жесткость

$$j_{о.п} = \frac{0{,}15d^4E}{l^3}.$$

Для уменьшения погрешностей обработки следует глубину шлифования последующего хода уменьшать до величины погрешности обработки предыдущего хода, либо применять выхаживание. Заданную точность обработки можно обеспечить также путем рационального подбора характеристик кругов, режимов шлифования и способа подвода СОЖ в зону контакта круга с деталью (см. § 2.7).

Весьма перспективным методом обеспечения высокой (до 1—2-го классов) точности обработки является использование систем автоматического управления (САУ) или автоматического регулирования (САР) процесса шлифования [61]. САР имеет обратную связь, в которой из-за возмущающего действия (изменение взаимного положения узлов станка, тепловые или силовые деформации детали и т. д.) принятого источника происходит отклонение регулируемой величины от ее заданного значения, приводящее к соответствующему изменению регулирующего воздействия. В этой связи САР является более перспективной.

Рис. 2.25. Влияние неуравновешенной массы шлифовального круга на шероховатость Ra и волнистость $H_в$ обработанной поверхности при круглом наружном шлифовании стали 40ХГНМ (HRC 48—50) кругом ПП 300×40×127 24А25СМ17К5 при $v = 38$ м/с; $v_1 = 30$ м/мин; $t = 0{,}01$ мм/ход



Шероховатость обработки. Весьма важным показателем качества обработки, оказывающим существенное влияние на эксплуатационные свойства деталей, является шероховатость обработанных поверхностей. Микрорельеф поверхности зависит от кинематики и режима шлифования, свойств обрабатываемого материала, характеристики круга, вибраций, сопровождающих процесс шлифования, степени пластической деформации срезаемого и поверхностного слоев материала, вида и способа подачи СОЖ в зону обработки.

Теория и практика показывают, что с уменьшением зернистости шлифовального круга шероховатость обработанных поверхностей снижается. Возрастание твердости круга и плотности его структуры способствует снижению микронеровностей обработанных поверхностей. К этому же приводит использование абразивных кругов на органических связках по сравнению с керамическими. Так как шлифование мягких пластичных материалов сопровождается образованием значительных развалов по краям следов среза отдельных зерен круга, то увеличение твердости и снижение пластичности обрабатываемого материала приводит при прочих равных условиях к уменьшению шероховатости обработки.

Некоторые рекомендации [97] по выбору характеристик абразивных кругов в зависимости от заданной шероховатости обработки при шлифовании различных материалов приведены в табл. 2.62 (здесь представлены рекомендации применительно к шлифованию деталей с обычными скоростями круга; данные по шероховатости обработки при скоростном шлифовании приведены в § 2.11). В табл. 2.59 даны характеристики кругов для шлифования с продольной подачей; при врезном шлифовании следует увеличить твердость кругов на одну-две степени.

Процесс шлифования сопровождается вибрациями. К числу наиболее значимых источников колебаний следует отнести неуравновешенность шлифовального круга, обусловленную погрешностями его формы и размеров, неравноплотностью структуры инструмента и другими причинами.

На рис. 2.25 показано, что оба параметра качества возрастают по мере неуравновешенной массы круга.

При шлифовании деталей алмазными и эльборовыми кругами шероховатость поверхностей зависит от условий обработки. В табл. 2.63 приведен ориентировочный выбор характеристик алмазных кругов в зависимости от заданной шероховатости обработки. Высота микронеровностей Ra при алмазном шлифовании твердых сплавов торцом круга может быть рассчитана по следующей формуле:

$$Ra = C_R t^{x_R} v_1^{y_R} v^{z_R} F^{m_R} \prod_{i=1}^{q} K_{Ri}, \qquad (2.35)$$

где C_R — коэффициент, зависящий от вида связки алмазного круга; t — глубина шлифования; v_1 — продольная подача детали; v — скорость вращения круга; F — площадь обработки; K_{Ri} — поправочный коэффициент на иные условия шлифования; q — число учитываемых поправочных коэффициентов; x_R, y_R, z_R, m_R — показатели степеней.

Значения C_R, K_{Ri}, x_R, y_R, z_R, m_R приведены в табл. 2.64.

Таблица 2.62

Выбор характеристик абразивных кругов в зависимости от шероховатости обработки

Вид шлифования	*Ra*, мкм	Конструкционная сталь		Быстрорежущая закаленная сталь	Чугун и бронза	Твердый сплав
		незакаленная	закаленная			
Круглое наружное	3,2—5,0	15А40—50СМ2—С1К	15А40—50СМ1—СМ2К	23А40—50СМ1К	53С40—50СМ1К	63С40—50СМ1К
	1,6—2,5	15А32—40С1—С2К	15А32—40СМ2—С1К	23А32—40СМ1К	53С32—40СМ1К	63С32—40СМ1К
	0,8—1,25	15А, 23А32—40С1СТ1К	15А, 23А32—40СМ2С1К	44А, 23А32—40СМ2К	15А, 53С32—40СМ2К	63С32—40СМ2БК
	0,4—0,63	23А16—25С2СТ1К	23А16—25С1—С2К	44А, 23А16—25СМ2К	15А, 53С16—25СМ2К	63С16—25СМ2БК
Круглое внутреннее	3,2—5,0	15А40—50СМ2—С1К	15А40—50СМ2К	23А40—50СМ2—С1К	53С50СМ1К	63С40—50М3К
	1,6—2,5	15А32—40С1—С2К	15А32—40СМ2—С1К	23А32—40СМ2—С1К	53С40СМ2К	63С32—40М3К
	0,8—1,25	15А, 23А25С2К	15А, 23А25С1К	44А, 23А32—40СМ1—СМ2К	53С, 15А25СМ2К	63С25—32СМ1К
	0,4—0,63	15А, 23А16С2К	15А, 23А16С2К	44А, 23А16—25СМ1—СМ2К	53С, 15А16С1К	63С16—25СМ1К
Плоское периферией круга	3,2—5,0	15А50СМ2К	15А50М3—СМ1К	23А40—50СМ2—С1К	53С, 15А50СМ2К	63С40—50СМ1К
	1,6—2,5	15А40СМ2К	15А40М3—СМ1К	23А32—40СМ2—С1К	53С, 15А40СМ2К	63С32—40СМ2К
	0,8—1,25	15А25С1К	15А25СМ1—СМ2К	23А32—40СМ1—СМ2К	53С, 15А25С1К	63С32—40М3—СМ1К
	0,4—0,63	15А16С1К	15А16СМ1—СМ2К	23А16—25СМ1—СМ2К	53С, 15А16С1К	63С16—25М3—СМ1К
Плоское торцом круга	3,2—5,0	15А50СМ1Б	15А50СМ1—СМ2Б	15А50—80СМ1—СМ2Б	53С, 15А50СМ2Б	63С40—50М3—СМ1Б
	1,6—2,5	15А40СМ1Б	15А40М2—СМ1Б	15А40—50СМ1—СМ2Б	53С, 15А40СМ2Б	63С32—40М3—СМ1Б
	0,8—1,25	15А25СМ2Б	15А25М3—СМ1Б	15А32—40М3—СМ2Б	53С, 15А25С1Б	63С32—40М2—М3Б
	0,4—0,63	15А25СМ2Б	15А25М3—СМ1Б	15А25М3—СМ2Б	53С, 15А25С1Б	63С16—25М2—М3Б
Бесцентровое	3,2—5,0	15А50С2К	15А50СМ2—С1К	23А40—50СМ1—СМ2К	53С50СМ2К	63С32—40СМ1К
	1,6—2,5	15А40СТ1К	15А40СМ2—С2К	23А32—40СМ1—СМ2К	53С40СМ2К	63С32—40СМ1К
	0,8—1,25	15А, 23А32СТ1К	15А, 23А32СМ1—С1К	44А, 23А32—40М3—СМ1К	53С, 15А25С1К	63С25СМ1К
	0,4—0,63	23А16—25СТ2К	23А16—25С1—СТ1К	44А, 23А16—25М3—СМ1К	53С, 15А16С2К	63С16М3—СМ1К

Таблица 2.63

Выбор характеристик алмазных кругов

Вид шлифования	Зернистость круга	Значения Ra, мкм, при связке		
		металлической	керамической	органической
Черновое	125/100—80/63	0,40—1,25	0,40—1,25	0,25—0,63
Предварительное	63/50—50/40	0,25—0,63	0,25—0,63	0,10—0,32
Чистовое	М40/28—М28/20	—	—	0,05—0,16
Тонкое	М14/10—М7/5	—	—	0,025—0,080

Одной из перспективных областей применения эльборовых кругов является *шлифование быстрорежущих сталей. При шлифовании быстрорежущих сталей* периферией эльборовых кругов на органической связке Б1

$$Ra = 0{,}93v^{-0{,}3}v_1^{0{,}06}t^{0{,}04}\prod_{i=1}^{V}K_{Ri}. \qquad (2.36)$$

Поправочные коэффициенты к формуле (2.36) приведены ниже.

Обрабатываемый материал	Р18Ф	Р18К5Ф	Р6М5	Р6М5КМ	Р10К10Ф3М4
Коэффициент K_{R1}	1,0	1,28	0,94	0,83	1,28
Концентрация эльбора, %	50	100	150	200	
Коэффициент K_{R2}	1,3	1,0	1,1	1,25	
Зернистость круга	63/50	100/80	125/100		
Коэффициент K_{R3}	1,0	1,32	1,44		

Состояние поверхностного слоя. Формирование поверхностного слоя у закаленных и незакаленных сталей (чугунов) при их абразивной обработке происходит не одинаково. В связи с кратковременностью действия тепловых импульсов при шлифовании в поверхностном слое детали из незакаленной стали не успевают произойти сколько-нибудь существенные фазовые превращения, и это подтверждается отсутствием, как правило, прижогов на обработанных поверхностях. Возникновение большого числа плоскостей сдвига, дробление и ориентирование блоков, а также образование текстуры, сопровождающие процесс стружкообразования при шлифовании, приводят к наклепу поверхностного слоя, обладающего повышенными механическими свойствами. В поверхностном слое шлифуемой детали протекают как упрочняющие, так и разупрочняющие процессы, причем превалирование одного из них над другим обусловлено в основном температурным фактором. Чем ниже температура, тем в меньшей степени проявляется разупрочняющий эффект, и, напротив, при достаточно высоких температурах может произойти настолько интенсивное разупрочнение, что микротвердость поверхностных слоев станет меньше исходной микротвердости. При значительных температурах наряду с разупрочнением происходит и термопластическая деформация, которая в этом случае является доминирующим фактором, способствующим образованию остаточных напряжений растяжения. Температура начала термопластических деформаций $\theta_н$ может быть ориентировочно определена по формул

$$\theta_н = \frac{\sigma_{0,2}}{\alpha E},$$

где $\sigma_{0,2}$ — предел текучести материала в зоне резания; α — коэффициент линейного расширения.

Если температура в зоне шлифования превысит температуру начала термопластических деформаций, то возникают остаточные растягивающие напряжения,

Таблица 2.64

Коэффициенты и показатели степеней для расчета высоты микронеровностей Ra по формуле (2.35)

Параметры оказывающие влияние на Ra	Коэффициент	Связки алмазных кругов												
		Органические			Металлические							Керамические		
		Б1	Б156	ТО2	М54	М58	М5	МИ2	ТМ	МВ1	МО13	К1	К5	К6
Обрабатываемый материал ВК8	C_R	75,4	24,2	34,9	39,6	96,5	56,2	26,2	57,7	57,6	65,6	78,0	126,5	126,2
	x_R	0,41	0,45	0,43	0,53	0,60	0,50	0,51	0,65	0,61	0,55	0,47	0,56	0,44
	y_R	0,52	0,41	0,38	0,56	0,63	0,40	0,48	0,62	0,58	0,49	0,41	0,47	0,38
	z_R	−1,15	−0,75	−0,83	−0,75	−0,90	−0,80	−0,70	−0,91	−0,76	−0,83	−0,90	−0,93	−0,96
	m_R	−0,35	−0,26	−0,30	−0,24	−0,25	−0,22	−0,18	−0,17	−0,21	−0,24	−0,30	−0,36	−0,38
Вид охлаждения:	K_{R1}													
эмульсия		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
без охлаждения		1,20	1,05	1,02	1,20	1,21	1,40	1,30	1,28	1,13	1,15	1,06	1,05	1,10
Марка зерна:	K_{R3}													
АСО		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
АСР		1,01	1,20	1,19	1,20	1,17	1,15	1,20	1,10	1,16	1,10	1,12	1,14	1,10
АСВ		1,10	1,23	1,21	—	1,23	1,18	1,31	1,20	1,23	1,15	1,12	1,16	1,12
Зернистость:	K_{R4}													
63/50		0,70	0,65	0,68	0,71	0,75	0,85	0,60	0,68	0,71	0,80	0,82	0,87	0,71
80/63		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
100/80		1,05	1,08	1,10	1,12	1,15	1,10	1,16	1,10	1,13	1,10	1,15	1,10	1,08
125/100		1,30	1,32	1,35	1,26	1,31	1,28	1,35	1,40	1,36	1,30	1,21	1,30	1,31
160/125		1,60	1,70	1,72	1,40	1,50	1,45	1,38	1,56	1,68	1,60	1,36	1,38	1,41
Концентрация круга:	K_{R2}													
50		0,73	0,91	0,87	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
100		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
150		1,12	1,17	1,21	1,15	1,18	1,20	1,25	1,30	1,26	1,23	1,28	1,31	1,28
200		1,30	1,32	1,29	—	1,26	1,31	1,35	1,40	1,37	1,26	1,35	1,36	1,30

которые при величинах, близких к пределу текучести обрабатываемого материала, приводят к трещинообразованию. Значения температур начала термопластических деформаций приведены ниже.

Обрабатываемая сталь	45	ХН35ВТЮ	ХН77ТЮР	13Х14М2ВФР	12Х18Н9Т
Интервал температур начала термопластических деформаций, °С	100—180	260—340	230—310	400—500	60—100

Очень чувствительны к термическим напряжениям и деформациям твердые сплавы, для которых особенно опасны растягивающие напряжения, поскольку предел прочности твердых сплавов при растяжении в 5—8 раз ниже, чем предел прочности при сжатии. Напряжения (в конце двойного хода), возникающие на поверхности твердосплавной пластины при плоском ее шлифовании, можно рассчитать по формуле

$$\sigma = \alpha E \theta \left(R \sqrt{\pi C} - 1\right),$$

где θ — контактная температура; R — функция, график которой приведен на рис. 2.26.

$$C = \frac{v_1}{2L - b},$$

где L — длина хода; b — длина теплового источника (ширина обода круга).

Формирование поверхностного слоя при шлифовании чугуна происходит аналогично образованию слоя при абразивной обработке незакаленной стали. В табл. 2.65 приведены характеристики шлифовальных кругов и режимы обработки распространенных марок чугуна, обеспечивающие получение наиболее благоприятных свойств поверхностного слоя. Особенностью формирования поверхностного слоя при шлифовании закаленной стали является то, что ее структура может выходить из равновесного состояния под действием даже кратковременных тепловых импульсов, возникающих не только при торцовом, но и при периферийном шлифовании, когда дуга контакта круга с деталью весьма мала. Определенное сочетание температур и сил резания может привести к образованию наклепанного слоя, обладающего повышенными механическими свойствами.

Таблица 2.65

Состояние поверхностного слоя при шлифовании чугуна торцом круга

Марка чугуна	Характеристика круга	Режим шлифования			Состояние поверхностного слоя		
		Скорость круга, м/с	Скорость детали, м/мин	Глубина шлифования, мм	Увеличение микротвердости по сравнению с исходной, %	Глубина измененного слоя, мкм	Величина сжимающих остаточных напряжений, кгс/мм²
СЧ 18-36	ЛО125/100 Б1 100%	25—30	3,0	0,005	30—50	30—45	30—40
СЧ 21-40	ЛО125/100—100/80 Б1 100%	25—30	3,0	0,005	30—40	30—45	35—40
СЧ 28-48	ЛО125/100 Б1 100%	25—30	1,5—2,0	0,005	52—70	40—60	40—50
	63С25СМ1К	10—15	4,0—6,0	0,010	40—65	До 80	До 60

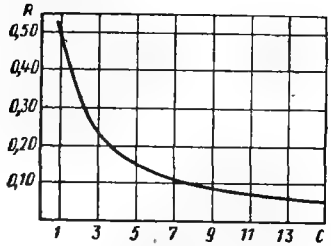


Рис. 2.26. График функции R (C)

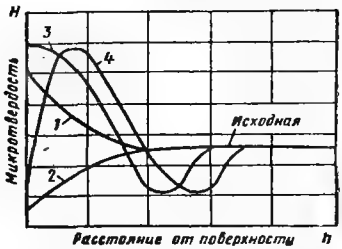


Рис. 2.27. Качественная картина распределения микротвердости по глубине детали в зависимости от состояния поверхностного слоя:

1 — наклеп; *2* — прижог отпуска; *3* — прижог вторичной закалки; *4* — прижог отпуска и вторичной закалки

В этом случае микротвердость на поверхности детали будет выше, чем исходная (кривая *1* на рис. 2.27). При повышении температуры до точки Ac_3 происходит отпуск мартенсита (прижог отпуска), и микротвердость на поверхности станет ниже, чем исходная (кривая *2*). При температурах шлифования, превышающих точку Ac_3, наблюдается вторичная закалка (прижог закалки), а последующее весьма быстрое охлаждение позволяет зафиксировать аустенитно-мартенситную структуру. Слой вторичной закалки с глубиной залегания до 0,01 мм имеет высокую микротвердость (выше мартенсита), хотя и может содержать до 70—80% аустенита. Это обусловлено мелкодисперсной его структурой и большой степенью наклепа остаточного аустенита. Обычно под вторично закаленным слоем находится слой с пониженной микротвердостью (кривая *3*). При значительных нагревах тонкого поверхностного слоя, когда тепло не успевает отводиться в глубь детали, может наблюдаться отпуск вторично закаленного граничного слоя вследствие медленного излучения тепла в окружающую среду. Распределение микротвердости в этом случае изображено кривой *4*.

Переход остаточного аустенита в мертенсит сопровождается изменением объема, что нередко ведет к изменению величины и даже знака остаточных напряжений. При работе лезвийным инструментом из быстрорежущей стали это превращение часто влечет за собой хрупкое разрушение режущих кромок. В табл. 2.66 приведено количество остаточного аустенита, образующегося при различных условиях шлифования основных марок быстрорежущих сталей [18].

Высокие температуры, возникающие в зоне шлифования, являются основной причиной, приводящей к появлению прижогов и трещин на обработанных поверхностях, и поэтому технологические мероприятия, способствующие снижению температуры, приводят к повышению качества обработки. К числу наиболее эффективных мероприятий такого рода следует отнести регулирование и обоснованный выбор (расчет) режимов шлифования (в особенности скорости круга и отношения скоростей круга и детали); характеристик кругов (применение высокопористых и прерывистых абразивных кругов, а также использование алмазных и эльборовых инструментов); состава и способа подвода СОЖ (в частности, применение струйно-напорного внезонного способа); способа вибрационного и упругого шлифования; рационального способа правки кругов.

Следует отметить, что применение электроалмазного и электроабразивного шлифования приводит в основном к появлению сжимающих поверхностных напряжений. Аналогичные напряжения могут быть получены при применении эльборовых кругов для шлифования деталей из быстрорежущих сталей. В табл. 2.67 приведены условия плоского шлифования быстрорежущих сталей периферией эльборовых кругов, при которых поверхностный слой получает благоприятные свойства.

В табл. 2.68 приведены данные, характеризующие свойства поверхностного слоя легированных сталей 40ХГНМ и чугуна СЧ 75-50-03 при их круглом наружном скоростном шлифовании абразивным и алмазным кругами.

Таблица 2.66

Количество остаточного аустенита при шлифовании закаленных быстрорежущих сталей

Вид шлифования	Марка быстрорежущей стали	Характеристика круга	Режим шлифования			Количество остаточного аустенита, %
			Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Глубина шлифования, мм/дв. ход	
Плоское периферией круга	Р6М5, Р6М6К5, Р18К5Ф, Р10К10Ф3М4, Р18Ф	ЛО63/50—125/100 Б1 100%	30—35	2—4	0,005—0,015	20
Плоское торцом круга	Р12, Р18, Р9К5 Р9К10, Р9Ф5	КО80/63—125/100 Б1 100—150%	20—25	1,0—1,5	0,02—0,03	20
		КО80/63—125/100 Б1 100—150% с применением СОЖ	20—25	1,5—2,0	0,03—0,06	14
		КР80/63—125/100 МО4 100—150% с применением СОЖ	30—35	2—3	0,03—0,06	14

Таблица 2.67

Свойства поверхностного слоя при плоском шлифовании деталей из быстрорежущих сталей эльборовыми кругами

Марка стали	Характеристика круга	Режим шлифования			Свойства поверхностного слоя		
		Скорость круга, м/с	Продольная подача, м/мин	Глубина шлифования, мм	Относительное повышение микротвердости, %	Глубина (измененного слоя), мкм	Состояние
Р18Ф (*HRC* 64—66)	ЛО63/50—125/100 Б1 100%	35 49	4 7	0,005—0,010 0,015	104—108 110—115	5—15 20—60	Наклеп Прижог вторичной закалки
	ЛО63/50Б1 50% ЛО63/50Б1 150—200%	35 35	4 4	0,010 0,010	90—95 103—108	5—30 5—30	Прижог отпуска Прижог вторичной закалки
Р18К5Ф (*HRC* 64—66) Р10К10Ф3М4	ЛО63/50—125/100 Б1 100%	35	4	0,010	105—115	15—20	Наклеп
Р6М5 (*HRC* 64—66) Р6М5К5 (*HRC* 64—66)	ЛО63/50—125/100 Б1 100%	23 35	4 4	0,010 0,010	100 94—97	5—15 5—15	Наклеп Прижог отпуска

Таблица 2.68

Свойства поверхностного слоя деталей при скоростном шлифовании

Материал обрабатываемой детали	Вид и характеристика круга	Режим шлифования			Свойства поверхностного слоя			
		Скорость круга, м/с	Скорость детали, м/мин	Продольная подача, м/мин	Глубина шлифования, мм	Относительное изменение микротвердости, %	Глубина измененного слоя, мкм	Микроструктура
Сталь 40ХГНМ (*HRC*48—50)	Абразивный 24А25СМ27К5	80	15	1,2	0,01	58	15—20	Прижог отпуска, трещины
		80	60	1,2	0,01	120	6—8	Наклеп
		80	80	1,2	0,01	127	6—10	»
		80	80	1,2	0,05	117	12—15	Прижог вторичной закалки
	Алмазный АСВ200/160МО16 100%	80	80	1,5	0,01	100	0	Без изменения
Чугун СЧ 75-50-03 (*HRC* 50—52)	То же	80	80	1,5	0,01	100	0	Без изменения
		25	25	0,5	0,01	152	40—45	Наклеп

§ 2.7. Смазочно-охлаждающие жидкости при шлифовании

Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) оказывают непосредственное влияние на производительность и качество абразивно-алмазной обработки. СОЖ классифицируют по химической структуре на водные и эмульсионные жидкости и углеводородные составы.

Водные СОЖ разделяют на электролиты, водные растворы поверхностно-активных веществ (ПАВ) и суспензии. Часто используют комбинированные составы, содержащие одновременно растворы солей и ПАВ. В зарубежной литературе СОЖ этого класса известны под названием химических или синтетических жидкостей.

Эмульсиями называют дисперсные системы, состоящие из двух жидкостей, не растворимых или малорастворимых друг в друге. Жидкость, являющаяся дисперсной фазой, распределена в форме мельчайших капелек. При обработке материалов резанием применяют эмульсии типа масло в воде. Концентрат, разбавляемый водой, называют эмульсолом. Современные эмульсии являются сложными коллоидными системами, включающими эмульгаторы, активные присадки, ингибиторы коррозии, бактерицидные добавки и другие компоненты.

К углеводородным средам относят минеральные и растительные масла. Иногда используют компаундированные системы — смеси минеральных и растительных масел. Однако последние дороги и дефицитны. Значительно чаще используют минеральные масла, легированные присадками, которые по характеру действия можно разделить на антифрикционные, противоизносные и противозадирные. Масла с присадками обычно гораздо эффективнее чистых минеральных масел. К углеводородным СОЖ относят также органические растворители, например четыреххлористый углерод, керосин.

Каждая СОЖ должна обладать не только достаточно высокими смазочными, охлаждающими и моющими свойствами, но и удовлетворять комплексу эксплуатационных требований, важнейшими из которых являются нетоксичность, антикоррозионность, бактерицидность и гигиеничность. СОЖ не должна разъедать окраску оборудования и трубопроводы, вспениваться и разбрызгиваться, эмульгировать смазочные и гидравлические масла, вызывать заедание трущихся частей станка, разрушать изоляцию электрооборудования, сильно испаряться. СОЖ должна быть пожаро- и взрывобезопасна.

СОЖ оказывают токсическое действие на кожный покров и на внутренние органы из-за систематического вдыхания аэрозолей, образующихся при подаче жидкости в рабочую зону станка. Устранение или ослабление токсического действия СОЖ возможно при строгом выполнении комплекса конструктивных, технологических и организационных мероприятий по технике безопасности и промышленной санитарии при приготовлении, хранении, транспортировании, регенерации и разложении СОЖ перед спуском в сточные воды. При работе с распыленными СОЖ следует соблюдать гигиенические требования к применению смазки и охлаждения режущих инструментов распыленными жидкостями. Рекомендуется использование перед началом работы специальных мазей типа «невидимых перчаток», образующих на коже тонкую пленку, предохраняющую от контакта с вредными веществами. Применяют профилактические пасты типа ХИОТ-6, ЯЛОТ, ПМ-1 при работе с маслами и пасты ИЭР-2, ЛИОТ-ИГВА, цинкстеаратную мазь № 1 и 2 при работе с эмульсиями

Для подавления коррозионной агрессивности СОЖ используют ингибиторы и пассиваторы коррозии. Ингибиторы — вещества, замедляющие электрохимические процессы между внешней средой и металлом. Действие пассиваторов металла заключается в образовании на его поверхности защитной пленки, предохраняющей металл от дальнейшего развития коррозионных процессов. В качестве антикоррозионных присадок к водным растворам рекомендуется использовать соли щелочных металлов, буру, первичный и третичный фосфат, нитрит натрия, этаноламины, их соли с жирными кислотами. Для придания антикоррозионных свойств эмульсиям, ингибиторы коррозии можно вводить как в водную, так и в масляную фазы.

В водную составляющую эмульсий вводят нитриты натрия, калия и лития, соду, триэтаноламин, олеиновую кислоту, а в масляную — соединения бората глицерина с щелочами KOH, NaOH, LiOH, $Ca(OH)_2$, амином или спиртоамином. Наибольшее применение в производственных условиях завода-потребителя СОЖ находит ингибитор коррозии триэтаноламин и пассиватор нитрит натрия. От современных СОЖ требуется не только коррозийная инертность, но и консервационное действие. Определение коррозирующего действия масел на металлы производят по ГОСТ 2917—45, определение коррозирующего действия эмульсолов — по ГОСТ 6243—75, сульфофрезолов — по ГОСТ 122—54.

СОЖ (особенно эмульсии) служат хорошей питательной средой для бактерий. Размножение бактерий ухудшает смазочные свойства СОЖ, вызывает помутнение, расслоение (эмульсий) и неприятный запах. Радикальным средством повышения бактерицидности СОЖ является использование всевозможных бактерицидных присадок: фенилфенолята натрия и других продуктов фенольного типа, нитробутанола, четвертичных аммониевых солей, метилового ацетата ртути, мертиолята, растворяемого в СОЖ в отношении 1 : 100 000—1 000 000. В отечественной практике в качестве бактерицидной добавки к эмульсиям чаще всего используют порошок гексахлорфена (ГОСТ 10397—66, МРТУ 6-01-119—67). Бактерицидную добавку приготовляют путем растворения 130 г гексахлорфена и 50 г каустической соды в 1 л воды. На 1 л эмульсии расходуется 1,2 г бактерицидной добавки. Высокоэффективной добавкой является также фурациллин.

Свойства всех СОЖ в процессе их эксплуатации изменяются, и необходим постоянный контроль качества жидкостей и периодическое восстановление их свойств путем добавления тех или иных компонентов или замены. В индивидуальных системах циркуляции СОЖ установлена следующая периодичность смены эмульсии: при трехсменной работе с полной загрузкой станка — через одну неделю, при меньшей загрузке — через две недели. Периодичность замены масляных СОЖ — 2 раза в месяц. Во всех случаях должны быть приняты меры для систематической очистки СОЖ от примесей, так как только при этом условии можно гарантировать плановый срок службы СОЖ и получение заданного качества шлифованных деталей, а также меры для стабилизации температуры СОЖ в течение всего периода ее использования.

Введение в водные растворы значительного количества смазочных и смачивающих присадок для улучшения их функциональных свойств способствует в то же время их вспениваемости. Пенообразование снижает технологическую эффективность СОЖ, способствует развитию бактерий и препятствует наблюдению за процессом обработки. К пенообразованию особенно склонны эмульсии и легкие минеральные масла. Для предотвращения вспениваемости СОЖ легируют специальными композициями. Антивспениваемость водных композиций обеспечивают при введении 5% кальцевых солей слабых кислот и триэтаноламинфосфата. Для эмульсий рекомендуется препарат, представляющий собой смесь минерального масла, полиэтилена и микрокристаллического парафина. Препарат вводят в эмульсол в количестве 3—5%. Хорошими антивспенивающими свойствами обладают присадки кремнийорганических веществ (полисилоксанов), вводимых в СОЖ в ничтожно малых количествах (0,03%). Для масляных СОЖ иногда применяют присадку, состоящую из следующих компонентов: 6—12% соли карбоксильной кислоты, 2—4% соли сульфокислоты, 0,05—1% окисленного микровоска, 70—90% минерального масла.

В некоторых случаях при абразивно-алмазной обработке используют горючие, взрыво- и пожароопасные препараты (керосин, легкие и средние минеральные масла, дизельное топливо, керосино-масляные составы и пр.). Под действием тепла, выделяющегося при шлифовании, углеводородные СОЖ частично сгорают с выделением дыма и запаха, что создает ненормальные гигиенические условия для работы. Во всех случаях использования подобных жидкостей должны быть приняты соответствующие профилактические меры, гарантирующие пожарную безопасность и нормальные санитарно-гигиенические условия работы.

Ниже приведены составы СОЖ (в весовых процентах), наиболее широко применяемых при шлифовании абразивными кругами и кругами из синтетических алмазов и эльбора.

№ СОЖ	Состав синтетических СОЖ
1	0,5—2% кальцинированной соды; 0,2—1% нитрита натрия
2	0,7—1% триэтаноламина; 0,25—0,3% нитрита натрия
3	0,5% триэтаноламина; 0,2—0,5% мылонафта; 0,2% олеиновой кислоты; 0,2% смачивателя ОП-7 или ОП-10; 0,2% тринатрийфосфата
4	0,5—1,8% триэтаноламина; 0,25—0,6% нитрита натрия или мылонафта; до 0,6% глицерина
5	СОЖ АВК-1 (ТНТСБО): 0,2% триэтаноламина; 0,4% нитрита натрия; 0,1% тринатрийфосфата; 0,2% буры; 0,3% кальцинированной соды; 0,1% смачивателя ОП-7
6	СОЖ АВК-2: 0,6% мылонафта; 0,4% триэтанолового мыла олеиновой кислоты; 0,2% борной кислоты; 0,3% кальцинированной соды; 0,4% нитрита натрия; 0,5% смачивателя ОП-7 или ОП-10
	СОЖ АВК-2ал (улучшенная): 0,6% мылонафта; 0,14% триэтаноламина; 0,3% борной кислоты; 0,1% кальцинированной соды; 0,3% нитрита натрия; 0,1—0,2% смачивателя ОП-7 или ОП-10
7	СОЖ ТУН: 0,16% триэтаноламина; 0,16% уротропина; 0,3% нитрита натрия
8	1% буры; 0,25% триэтаноламина
9	0,6% триэтаноламина; 0,25% буры; 0,25% нитрита натрия
10	3—5% трехзамещенного фосфорнокислого калия; 0,2—0,3% кальцинированной соды; 0,5—1% гексаметафосфата натрия
11	СОЖ МОТ-2: 0,2% мылонафта; 1% олеиновой кислоты; 0,5% триэтаноламина
12	0,6% тринатрийфосфата; 0,5% ализаринового масла; 0,25% нитрита натрия
13	Жидкость ВНИИАЛМАЗа: 0,6% тринатрийфосфата; 0,5% вазелинового масла; 0,3% буры; 0,25% триэтаноламина или кальцинированной соды; 0,1% нитрита натрия
14	0,6% роданида железа
15	0,7% нитрита аммония

№ СОЖ	Состав эмульсий
	Из эмульсола НРЛ-205 (ТУ 38-1-242—69)
16	3%-ная
17	5%-ная
19	5%-ная из эмульсола ЭМУС
	Из эмульсола Укринол-1 (ТУ 38-101-197—72)
20	2—3%-ная
21	5%-ная
22	7%-ная из эмульсола Аквол-2 (ТУ 38-4-01-10—70)
23	5%-ная из эмульсола СДМУ-2 (МРТУ 38-1-258—67)
24	5—10%-ная из эмульсола Р3-СОЖ 8
	Из эмульсола Э-2 или ЭТ-2 или ЭГТ (ГОСТ 1975—75)
25	5—5%-ная
26	5%-ная
27	10%-ная
28	5—7%-ная из эмульсола Т
29	7—10%-ная из эмульсола НСК-5
30	5—10%-ная из эмульсола ИХП-45Э
31	5—10%-ная из эмульсола ИХП-118Э

№ СОЖ	Состав углеводородных СОЖ
32	Масло ОСМ-3 (ТУ 38-УССР 2-01-152—73)
33	Масло индустриальное 12 или индустриальное 20 (ГОСТ 20799—75)
34	Масло индустриальное 45 (ГОСТ 20799—75)
35	Сульфофрезол (ГОСТ 122—54)
36	Керосин (ГОСТ 4753—68)
37	10—20% керосина (дизельное топливо); 90—80% сульфофрезола
38	30—50% керосина; 70—50% масла индустриального 20
39	25% керосина; 60% сульфофрезола; 15% олеиновой кислоты
40	92—96% керосина [масла индустриального 12 (20)]; 8—4% олеиновой кислоты
41	90—99% масла индустриального 12; 1—10% олеиновой кислоты
42	СОЖ МР-1 (ТУ 38-101-247—73)
43	СОЖ МР-Т (МР-4)

Рекомендации по выбору СОЖ для шлифования абразивными кругами

Таблица 2.69

Материал обрабатываемой детали	Класс СОЖ	Разновидности шлифования				
		Круглое наружное, плоское периферией круга	Внутреннее	Бесцентровое	Плоское торцом круга, разрезание	Резьбозубошлифование
Конструкционные углеродистые стали	С	1—6, 8, 11	1—6, 8, 11	1—6, 8, 11	1—6, 8, 11	—
	Э	16, 17, 20, 25, 26, 28	16—18, 20, 21, 25—29	16—18, 20, 21, 25—28, 30, 31,	16—18, 20, 21, 25—29	—
	У	—	33, 38	—	—	32—35, 38, 42
Легированные стали	С	2—5, 8, 11	2—5, 8, 11	2—5, 8, 11	2—5, 8, 11	—
	Э	17—21, 23, 24, 28	17—24, 28—31	17—24, 29—31	17—21, 23, 24, 28	—
	У	—	32, 33, 37—43	—	—	32, 33, 37—43
Высоколегированные стали: инструментальные, коррозионно-стойкие, жаростойкие, кислотоупорные	С	2—5	2—5	2—5	2—5	—
	Э	18, 21, 23, 24, 29—31	18, 21, 23, 24, 29—31	18, 21—24, 29—31	18, 21, 23, 24, 29—31	—
	У	32—35, 37—43	32—35, 37—43	32—35, 37—43	32—35, 37—43	32, 35, 37—43
Титан и сплавы на его основе	С	1, 10, 14, 15	1, 10, 14, 15	—	1, 10, 14, 15	—
	Э	24	24	—	24	24
	У	43	43	—	43	43
Медь и сплавы на его основе	С	1, 2, 5, 8	1, 2, 5, 8	—	1, 2, 5, 8	—
	Э	16, 17, 19—21, 23, 25—28	17—19, 21, 23, 26—28	—	16, 17, 19—21, 23, 25—28	—
	У	33	33	—	33	33

Продолжение табл. 2.69

Материал обрабатываемой детали	Класс СОЖ	Разновидности шлифования				
		Круглое наружное, плоское периферией круга	Внутреннее	Бесцентровое	Плоское торцом круга, разрезание	Резьбозубошлифование
Алюминий и сплавы на его основе	С Э У	3, 5, 6 16—21, 25—27 37—40	3, 5, 6 17—19, 21, 25—27 37—40	— — —	3, 5, 6 16—21, 25—27 37—40	— — 37—40
Чугуны	С Э У	1, 2, 4—7 16—21, 23, 25—27, 29 —	1, 2, 4—7 17—21, 23, 26, 27, 29 —	1, 2, 4—7 17—21, 23, 26, 27, 29 —	1—2, 4—7 16—21, 23, 25—27, 29 36	— 18, 21, 36—38
Стекло, керамика, графит, мрамор	С	Вода, 1, 2	Вода, 1, 2	Вода, 1, 2	Вода, 1, 2	—
Пластмассы	С Э	Вода 16—17, 19, 20, 25—29	Вода 16—17, 19, 20, 25—29	Вода 16—17, 19, 20, 25—29	Вода 16—17, 19, 20, 25—29	— —

Примечания: 1. Номера СОЖ см. на с. 142.
2. Условные обозначения классов СОЖ: С — синтетические; Э — эмульсии; У — углеводородные

Таблица 2.70

Рекомендации по выбору СОЖ для шлифования кругами из синтетических сверхтвердых материалов

Материал обрабатываемой детали	Шлифовальный круг		Класс СОЖ	№ СОЖ
	Режущий материал	Связка		
Легированные и высоколегированные стали: инструментальные (быстрорежущие), коррозионно-стойкие, жаростойкие	Алмаз синтетический	Органическая, керамическая	С Э	2—5, 8, 9, 13 16—20, 26, 27, 29
		Металлическая	С У *	2, 6, 13 32, 35, 42, 43
	Эльбор	Органическая, керамическая	С Э У **	1—5, 12 16—29, 26, 27 32, 33, 35, 43
Чугуны	Алмаз синтетический	Органическая	С	1, 2
Твердые сплавы			С Э	5, 6, 13 18, 19, 21
		Металлическая	С Э У *	1, 2, 13 16—21, 29 32, 35, 42, 43
Твердый сплав и углеродистая сталь		Керамическая	С Э	13 16, 20, 25
Стекло, керамика, пластмассы		Металлическая	С Э	2, 4, 12 19

Примечание. Номера СОЖ см. на с. 142.

* Для шлифования резьбы и разрезки.

** Для глубинного шлифования, для капельной подачи на операциях доводки режущего инструмента и для шлифования резьбы кругами на керамической связке.

Водные растворы приготовляют на машиностроительных заводах. Эмульсии и масла выпускают специализированные предприятия. Рекомендации по выбору СОЖ приведены в табл. 2.69 и 2.70. При пользовании рекомендациями по выбору СОЖ следует учитывать, что отечественной промышленностью созданы новые эмульсолы, обеспечивающие существенное повышение производительности шлифования деталей из легированных сталей и других материалов. Особенно эффективны эмульсии из эмульсолов Укринол-1, Аквол-2, ИХП-45Э и др., а также масляные жидкости ОСМ-3, МР-Т, МР-1. Однако новые СОЖ пока значительно дороже давно освоенных промышленностью.

Интенсивность охлаждающего, смазочного и моющего действий СОЖ в существенной мере зависит от способа ее подачи. В табл. 2.71 сопоставлена эффективность известных способов подачи СОЖ при шлифовании. В каждом случае состав СОЖ полагался заданным, и оценка эффективности того или иного способа подачи СОЖ в связи со свойствами жидкости не учитывалась.

Подача СОЖ к зоне резания свободно падающей струей, часто называемая «охлаждение поливом» (способ № 1, табл. 2.71), наиболее широко применяется

Таблица 2.71

Ориентировочная оценка эффективности способов подачи (подвода) СОЖ при шлифовании

№ способа	Способ подачи СОЖ	Количество одновременно использованных СОЖ	Действие СОЖ				
			Смазочное	Охлаждающее	Моющее по отношению к		
					кругу	детали	станку
	Основные способы						
1	Свободно падающей струей (поливом)	1	н	у	н	х	х
2	Напорной струей	1	у	х	у	в	х
3	В виде воздушно-жидкостной смеси	1	н	у/н	н	н	н
4	Через поры круга	1	в/х	н	у	н	н
5	В среде охлаждающей жидкости	1	в	х	у	у	у
6	Струйно-напорный внезонный	1	х	в	в	х/в	х
7	С ультразвуковыми колебаниями	1	х	у	в	у	у
8	Контактный	1	в/х	н	н	у	н
9	Гидроаэродинамический	1	х	в	х/в	х	х
	Комбинированные способы						
10	Полив * и через поры круга (№ 1 и № 4)	2 (1)	о	у	у	х	х
11	Полив * и струйно-напорный внезонный (№ 1 и 6)	1	х	в	в	в	в
12	Полив и с ультразвуковыми колебаниями (№ 1 и 7)	1	х	у	в	х	х
13	Полив * и контактный (№ 1 и 7)	2	о/х	у	о	х	х
14	Струйно-напорный внезонный и контактный (№ 6 и 8)	2	о	в	в	х/в	х
15	Полив * и гидроаэродинамический (№ 1 и 7)	1	х	в	в/х	в	в
16	Гидроаэродинамический и контактный (№ 8 и 7)	2	о	в	х/в	х	х
17	Полив *, струйно-напорный внезонный и контактный (№ 1, 6 и 8)	2	о	в	в	в	в

Примечание. Условные обозначения при оценке действия СОЖ: н — незначительное; у — удовлетворительное: х — хорошее; в — высокоэффективное; о — особо высокоэффективное.

* Вместо полива применяют также подачу СОЖ напорной струей (способ № 2).

на универсальных шлифовальных станках. СОЖ подают к зоне резания центробежным электронасосом через сопло, имеющее щелевое выходное отверстие; скорость истечения жидкости примерно 1 м/с. Интенсивность подачи СОЖ должна возрастать с увеличением площади контакта между инструментом и деталью, высоты круга и плотности его структуры, а также с уменьшением размеров абразивных зерен. Чем выше должно быть качество шлифованной детали, сложнее ее форма, тоньше стенки полых деталей, тем обильнее следует подавать СОЖ. При круглом наружном, внутреннем и плоском шлифовании периферией круга расход СОЖ должен быть не менее 8—10 л/мин, а при бесцентровом шлифовании 3—6 л/мин на каждые 10 мм длины контакта; при плоском шлифовании торцом круга 10—15 л/мин на каждые 10 мм ширины сегмента или кольца.

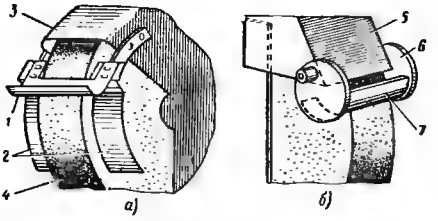


Рис. 2.28. Устройства для отвода (отрыва) воздушного потока

На эффективность действия СОЖ, подаваемых свободно падающей струей, большое влияние оказывают воздушные потоки, создаваемые вращающимся шлифовальным кругом. Эти потоки препятствуют взаимодействию СОЖ с рабочей поверхностью шлифовального круга и доступу СОЖ в зону контакта круга и обрабатываемой детали. Для защиты от вредного влияния воздушных потоков используют, например, дуговые пластины *1* и *2*, отводящие окружные и торцовые воздушные потоки от зоны контакта круга с деталью (рис. 2.28, *а*). Пластины монтируют на защитном кожухе *3* шлифовального круга *4*, вышлифовывающего при наладке устройства в пластине *1* выемку. По мере износа круга пластины периодически поворачивают таким образом, чтобы зазор между кругом и пластиной *1* сохранялся минимальным. Торцы пластин *2* также подшлифовывают по кругу. Более современное, хотя и несколько более сложное, устройство (рис. 2.28, *б*) шарнирно монтируют на козырьке *5*. Оно выполнено в виде желобчатого щитка *6* с фланцами *7*.

Принципиальная схема подачи СОЖ напорной струей не претерпевает каких-либо изменений по сравнению с подачей СОЖ свободно падающей струей, лишь давление жидкости повышается до 10—15 кгс/см^2 и более. Повышение давления приводит к увеличению скорости потока СОЖ, что интенсифицирует отвод тепла от шлифуемой детали. Эффективность охлаждающего действия возрастает в результате проникновения СОЖ, преодолевающей сопротивление воздушных потоков, к участкам поверхности детали, расположенным в непосредственной близости от зоны контакта с абразивными зернами, т. е. к источнику тепловыделения; усиливается в известной мере и смазочное действие СОЖ. Поэтому подача СОЖ напорной струей в зону резания оказывается, как правило, более эффективной, чем подача СОЖ свободно падающей струей. Подача СОЖ напорной струей сопровождается значительным разбрызгиванием жидкости. Поэтому применение способа возможно только при надежной герметизации рабочей зоны станка.

Способ подачи СОЖ в виде струи воздушно-жидкостной смеси всесторонне исследован. Разработаны надежные промышленные устройства для применения его на различных станках [110]. Способ может быть эффективен на операциях абразивной обработки, выполнявшихся ранее без охлаждения, и прежде всего при абразивном затачивании и доводке. Этот способ подачи СОЖ при шлифовании менее эффективен, чем охлаждение поливом.

Подача СОЖ через поры круга. Схематические изображения устройств для подачи СОЖ сквозь поры шлифовального круга показаны на рис. 2.29. От гидронасоса через патрубок СОЖ подается в коническую воронку *1*, из которой через каналы *2* и отверстия в распределительных кольцах *3* попадает во внутреннюю полость шлифовального круга. Под действием центробежных сил СОЖ проходит через поры на рабочую поверхность инструмента.

Для подачи СОЖ через круг используют обычно минеральные масла с присадками; если применяют эмульсию, то расход жидкости должен быть таким, чтобы

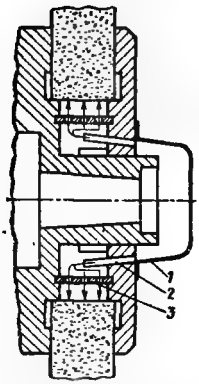


Рис. 2.29. Устройство для подачи СОЖ сквозь поры шлифовального круга

во внутренней полости круга поддерживалось избыточное давление СОЖ в пределах 0,5—1,5 кгс/см². В зависимости от условий шлифования и состава применяемой СОЖ расход жидкости изменяется от 100 капель в минуту до 20 л/мин. Лучшие результаты обеспечиваются, когда подача через поры круга углеводородной СОЖ, имеющей хорошие смазочные свойства, сочетается с одновременной подачей свободно падающей струей в зону резания другой СОЖ, обладающей хорошими охлаждающими свойствами (способ № 10, табл. 2.71). Способ № 4 (табл. 2.71) неприменим для шлифовальных кругов на вулканитовой и бакелитовой связках, так как они практически не имеют сквозных пор. Чтобы исключить засорение пор круга, содержание механических примесей в СОЖ не должно превышать 0,03%, а при шлифовании мелкозернистыми кругами должно быть еще значительно меньше. При заполнении пор круга жидкостью иногда возникает так называемая структурная неуравновешенность, обусловливающая повышение вибраций шлифовальной бабки.

Шлифование в среде СОЖ применяют сравнительно редко, главным образом при ленточном и плоском шлифовании и разрезании (отрезании) небольших деталей. В случае особой опасности появления тепловых дефектов (трещин, прижогов) жидкостную ванну целесообразно выполнить проточной.

Струйно-напорным внезонным способом СОЖ подают под давлением на рабочую поверхность шлифовального круга вне зоны резания через одно или несколько сопл. Струи СОЖ с определенной силой действуют на рабочую поверхность круга, очищая поры и абразивные зерна от частиц металла и отходов шлифования. Поверхность круга смачивается СОЖ и на ней формируются смазочные пленки. Способ охлаждения детали зависит от условий шлифования. Если подача СОЖ напорной струей на круг осуществляется через неподвижное многоканальное сопло *1* (рис. 2.30), то расход СОЖ достаточно велик, и шлифовальный круг *2* выносит из-под кожуха *3* поток СОЖ, попадающий на обрабатываемую деталь. Расход СОЖ через подвижное сопло (при шлифовании кругами высотой $H > 50$ мм), имеющее одно или несколько выходных отверстий (каналов), относительно мал, и поэтому охлаждение детали в этом случае следует осуществлять через стандартное щелевое сопло. Подача СОЖ на деталь *4* будет комбинированная: одновременно напорной струей через подвижное сопло *1* и свободно падающей струей через щелевое сопло *5* (способ № 11, табл. 2.71).

Диаметр выходных отверстий неподвижного многоканального сопла принимают 0,5—0,6 мм при давлении СОЖ порядка 30 кгс/см². При шлифовании деталей из высоколегированных труднообрабатываемых материалов давление СОЖ следует повысить до 100 кгс/см². Для всех подвижных сопл рекомендуется принимать диаметр выходного отверстия равным 0,9—1 мм, число выходных отверстий — 3, скорость движения примерно 2 м/с при давлении СОЖ 30 кгс/см² и более. Расстояние от сопла до рабочей поверхности шлифовального круга должно быть по возможности минимальным, но не более 40 мм. Оптимальный угол установки всех сопл $\alpha = 90 \div 120°$.

С технической и экономической точек зрения струйно-напорный внезонный способ является одним из наиболее эффективных при круглом наружном, внутреннем и бесцентровом шлифовании, следует только учитывать относительно сложную технику реализации этого способа.

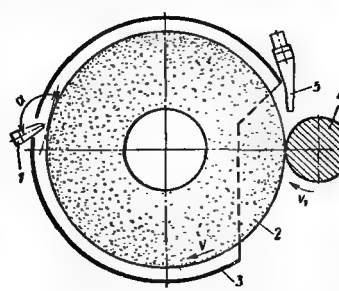


Рис. 2.30. Схема подачи СОЖ струйно-напорным внезонным способом при шлифовании

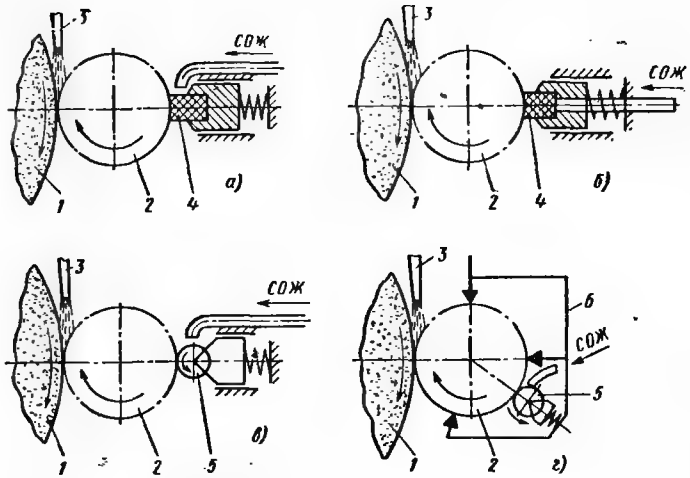


Рис. 2.31. Схемы устройств для подвода СОЖ контактным способом при круглом наружном шлифовании:

1 — шлифовальный круг; *2* — шлифуемая деталь; *3* — щелевое сопло для подачи СОЖ поливом; *4* — пористый элемент; *5* — вращающийся пористый элемент; *6* — трехконтактная измерительная скоба

Подача СОЖ с ультразвуковым колебаниями (способ № 7, табл. 2.71) осуществляется следующим образом: на кожухе шлифовального круга устанавливают генератор колебаний звуковой частоты. Алюминиевую головку (сопло), соединенную с генератором, располагают у периферии (рабочей поверхности) круга. Через сопло на рабочую поверхность круга подают СОЖ (эмульсию), которая, как и сопло, получает ультразвуковые колебания. Вследствие волнового характера движения жидкости усиливается ее воздействие на поверхность шлифовального круга, обеспечивается очистка этой поверхности от частиц металла и отходов шлифования, уменьшается засаливание и повышается работоспособность круга. Этот способ подачи СОЖ применяют пока в экспериментальных и опытных производствах.

Подача СОЖ контактным способом. Принципиальные схемы устройств для подвода СОЖ контактным способом показаны на рис. 2.31. Одновременно с поливом зоны резания свободно падающей струей СОЖ, обладающей хорошими охлаждающими свойствами, на обрабатываемую поверхность вне зоны резания непрерывно наносят тончайший слой активной смазки путем поджима к шлифуемой поверхности мягкого пористого материала, пропитываемого смазкой. Благодаря чрезвычайно малому расходу (10—15 г/ч) и отсутствию разбрызгивания или распыления активной смазки обеспечивается возможность применения технологически эффективных составов. Смазку (минеральные масла с присадками) наносят на неподвижный пористый элемент (рис. 2.31; *а*) или подводят через него (рис. 2.31, *б*) к поверхности детали *2*. Более совершенны устройства, выполненные по схемам рис. 2.31, *в*, *г* и имеющие вращающийся, почти не изнашивающийся пористый элемент *5*. Устройство по схеме рис. 2.31, *г* смонтировано на стандартной трехконтактной измерительной скобе (на период съема готовой детали и установки заготовки рабочую зону станка полностью освобождают).

Гидроаэродинамический способ подачи СОЖ. Сущность гидроаэродинамического способа подачи СОЖ заключается в использовании воздушных потоков, создаваемых вращающимся шлифовальным кругом, для повышения скорости движения жидкостного потока относительно рабочей поверхности шлифовального круга и шлифуемой детали. С помощью специальных устройств активированный поток СОЖ направляется на рабочую поверхность шлифовального круга, очищая

Таблица 2.72

Области применения способов подачи СОЖ при абразивном шлифовании

Материал обрабатываемой детали	Виды шлифования				
	Круглое наружное, плоское периферией круга, бесцентровое	Внутреннее плоское торцом круга	Резьбо-зубошлифование	Отрезание, разрезание	Ленточное
Стали:					
конструкционные	1, 9, 6, 15	1, 2, 6	11, 2, 9	2, 1, 5, 11	5, 1, 3
углеродистые	11, 2	10, 11	15, 6, 10		
легированные и высоколегированные	9, 15, 6, 11 2, 10, 13, 12, 1	11, 2, 10, 1, 6	11, 2, 6, 9, 15, 1, 10	2, 11, 1, 5, 15, 6	5, 1, 3
Титан и сплавы на его основе	11, 2, 15, 13, 12, 1, 6, 9, 10	2, 11, 6, 1, 10	11, 2, 12, 1	2, 11, 1, 5, 15	5, 1
Медь, алюминий и сплавы на их основе	9, 15, 11, 12, 13, 1, 2, 6	11, 2, 6, 1	11, 2, 12, 1	11, 2, 15, 5, 1	5, 1
Чугуны	1, 9, 15, 11, 2, 6, 3	11, 1, 2	11, 2, 1	2, 11, 1, 5, 15	5, 1, 3
Стекло, керамика, пластмассы	2, 1, 15, 11, 6, 9, 5	2, 1, 11, 5	5, 2, 1, 11	2, 11, 5, 15, 1	—

Примечания: 1. Номера способов подачи СОЖ соответствуют способам, указанным в табл. 2.67.
2. Способы подачи СОЖ указаны в порядке убывающей эффективности.

ее от налипов металла и отходов шлифования и смачивая, а затем в зону контакта круга с деталью, преодолевая в обоих случаях сопротивление воздушных потоков. Схема одного из устройств для подачи СОЖ гидроэлектродинамическим способом показана на рис. 2.32. Удлиненное клиновидное сопло (насадок) в нижней части выполнено П-образной формы и охватывает по торцам шлифовальный круг *2*. К нижней части сопла *1* плоской пружиной *3* прикреплена пористая эластичная заслонка *4*, свободный конец которой слегка прижимается к поверхности невращающегося шлифовального круга. П-образная часть сопла может быть выполнена сменной. В этом случае расширяется диапазон применяемых шлифовальных кругов и диаметров обрабатываемых деталей. Плоская пружина *3* позволяет производить быструю смену пористой эластичной заслонки, срок службы которой 100—200 ч работы станка. Для предотвращения разбрызгивания СОЖ, выносимой из-под кожуха шлифовальным кругом, на кожухе устанавливают отражатель *5*.

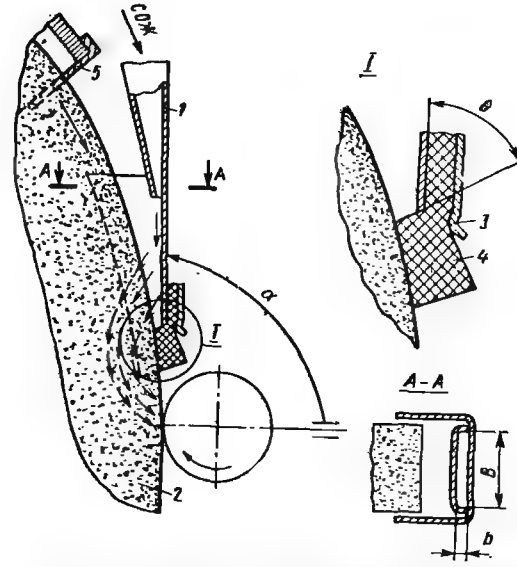


Рис. 2.32. Устройство для подачи СОЖ гидроаэродинамическим способом

Угол расположения сопла α относительно линии центров шлифовального круга и обрабатываемой детали должен находиться в пределах 75—95°. Ширину сопла *B* на выходе определяют в зависимости от высоты шлифовального круга и окружной скорости воздушного потока. При шлифовании со скоростями 30—35 м/с рекомендуется выполнять размер *B* на 4—5 мм меньше высоты круга. Размер *b* выходного сечения сопла определяют в зависимости от требуемого расхода и давления СОЖ; он не должен быть больше 1—1,5 мм. Наиболее благоприятные условия очистки и пропитки (смачивания) рабочей поверхности шлифовального круга СОЖ создаются при угле атаки струи (потока) СОЖ $\theta = 60°$.

В табл. 2.72 и 2.73 указаны рекомендуемые области применения описанных выше способов подачи СОЖ на шлифовальных операциях, осуществляемых при

Таблица 2.73

Области применения способов подачи СОЖ при алмазно-эльборовом шлифовании

Материал обрабатываемой детали	Виды шлифования			
	Круглое наружное, внутреннее плоское периферией круга	Плоское торцом круга	Фасонное (глубинное) резьбошлифование	Отрезание, разрезание
Легированные и высоколегированные стали	11, 2, 13, 12, 1	11, 2, 1	2, 11, 5, 1	2, 11, 1, 5
Чугуны	1, 11, 2, 3	11, 1, 2	2, 11, 5, 1	2, 11, 1
Твердые сплавы	1, 2, 11, 3	1, 2, 11, 3	2, 11, 5, 1, 3	11, 2, 1, 3
Стекло керамика, пластмассы	2, 1, 11, 5	2, 1, 11, 5	—	2, 5, 1, 11

Примечание. Номера способов подачи СОЖ соответствуют способам, указанным в табл. 2.67

скорости круга до 40 м/с. При скоростном и силовом шлифовании поток СОЖ должен быть динамически активирован, что достигается увеличением скорости истечения жидкости из сопла (подача СОЖ напорной струей и струйно-напорным внезонным способом) или использованием энергии воздушных потоков, окружающих шлифовальный круг (гидроаэродинамический способ). Только эти три способа (часто в комбинации с подачей СОЖ поливом) находят применение при скоростном и силовом шлифовании.

§ 2.8. Износ и стойкость кругов

Износ шлифовального круга. Абразивные зерна, участвующие в работе шлифования, при контакте с обрабатываемой поверхностью испытывают периодическое силовое и тепловое воздействие. Результатом этого воздействия являются: а) истирание вершин режущих кромок абразивных зерен, появление на них площадок износа и налипших частичек металла; б) выкрашивание (скалывание) микрочастиц абразивных зерен вследствие ударного характера нагрузки и усталостного разрушения; в) вырывание целых абразивных зерен из связки.

Перечисленные явления наряду с заполнением пор рабочей поверхности круга стружкой вызывают ухудшение режущих свойств абразивного инструмента и его размерный износ. Размерный износ круга и нарушение его правильной геометрической формы происходят главным образом из-за выкрашивания абразивных зерен и вырывания их из связки. Эти разновидности износа вместе с тем оказывают положительное влияние на процесс шлифования, вызывая самозатачивание круга. Самозатачивание, составляющее одно из основных отличий абразивного инструмента от лезвийного, состоит в том, что в результате выкрашивания абразивных зерен появляются новые острые режущие кромки, а при достаточно большом размерном износе в работу вступает новый ряд абразивных зерен, что позволяет сохранить высокую режущую способность круга в течение сравнительно длительного периода времени.

Ухудшение режущих свойств круга, вызванное затуплением абразивных зерен и налипанием на них металла, приводит к увеличению силы резания и температуры шлифования и в конечном итоге к ухудшению точности и качества обработки.

Размерный износ круга, как правило, вызывает нарушение его правильной геометрической формы: появление овальности, криволинейности образующей, неплоскостности в случае обработки торцом круга, появление волнистости на рабочей поверхности. Эти отклонения снижают точность обработки и вызывают волнистость на шлифованной поверхности. Чтобы восстановить первоначальное состояние круга, удалить с его рабочей поверхности дефектный слой и придать правильную форму, необходима правка круга.

Период работы круга между двумя правками характеризует его стойкость. Период стойкости круга зависит от его размеров и характеристики, материала и конфигурации обрабатываемой детали, режима резания, жесткости и виброустойчивости шлифовального станка, среды, в которой идет шлифование.

Для оценки износа кругов обычно используют два показателя: а) среднюю скорость износа, т. е. количество (по объему и массе) сошлифованного обрабатываемого материала в единицу времени работы круга Q_a (см³/мин, мм³/мм, г/мин, мг/мин) (иногда величину Q_a относят к единице высоты круга); б) удельный износ, т. е. объемное или массовое количество изношенного абразива, отнесенное соответственно к единице объема или массе сошлифованного металла q (см³/см³; мм³/мм³, мг/г). Количественную оценку изменения формы и размеров круга вследствие износа, необходимую для вычисления величин Q_a и q, производят непосредственным измерением его размеров или взвешиванием круга.

Наиболее распространенным методом является измерение круга до и после шлифования. Измерение может быть выполнено с помощью микрометра (для кругов небольших размеров) или индикатора с плоской головкой при измерении от специальной базы. Базой может служить наружная поверхность планшайбы, дополнительное кольцо, установленное на планшайбе вместе с кругом, или наклеенный на торец круга кусочек органического стекла с обточенной наружной

поверхностью. Измерение производят не менее чем в четырех противоположных точках по окружности круга и в трех точках вдоль образующей. Среднеарифметическое из 12 измерений гарантирует погрешность не более ±0,005 мм для кругов средних зернистостей и структур и ±0,007 мм для высокопористых и крупнозернистых кругов. Определив величину радиального износа ΔR, можно рассчитать среднюю скорость износа

$$Q_{\text{и}} = \frac{\pi D H \, \Delta R}{\tau},$$

где D — средний диаметр круга, равный полусумме диаметров до и после шлифования; H — высота круга, мм; τ — время шлифования, мин (выбрано достаточно большое для получения заметного радиального износа).

Для более точного измерения износа кругов (особенно алмазных и эльборовых кругов, а также в случаях точного профильного шлифования) может быть использован метод копирования профиля врезанием вращающегося круга в тонкую стальную пластинку. Предварительно на рабочей поверхности круга алмазом протачивают небольшой уступ высотой Δ. Измерение величины Δ до и после шлифования позволяет определить радиальный износ круга.

Нестабильность процесса шлифования, вызванная неуравновешенностью и неоднородной структурой круга, а также вибрациями в зоне шлифования, приводит к его неравномерному износу — некруглости и волнистости рабочей поверхности. Некруглость и волнистость круга переносятся на деталь, образуя на ней волны, имеющие по высоте и по длине (длина волны на детали теоретически уменьшается в v раз) по сравнению с длиной волны на круге.

Определение некруглости и волнистости круга производят методом ощупывания его рабочей поверхности при медленном вращении. Консольный тензометрический щуп с радиусным наконечником ($r \geqslant 25$ мм) и датчиком устанавливают на столе станка; шлифовальному кругу с помощью специального переносного редуктора сообщают медленное вращение (0,5—2 об/мин); перемещения щупа через тензостанцию записываются на фотоленте осциллографа. По такой же схеме можно записать микронеровности на рабочей поверхности круга, установив в щуп наконечник с меньшим радиусом ($r \leqslant 10$ мкм) и уменьшив скорость относительного перемещения до 10—20 мм/мин. Высота волнистости на круге обычно не выходит за пределы 50 мкм и зависит от твердости круга, режима и длительности шлифования, а также жесткости технологической системы.

Наиболее важным для практики критерием оценки износа круга является удельный износ. Ориентировочные значения удельного износа при шлифовании различных обрабатываемых материалов приведены в табл. 2.74 и 2.75. Большие значения удельного износа для каждого обрабатываемого материала соответствуют более интенсивным режимам шлифования и мягким шлифовальным кругам. Влияние интенсивности режима резания на величины $Q_{\text{а}}$ и q чаще всего выражают в виде степенных зависимостей $Q_{\text{а}} = CQ^m$ и $q = CQ^{m-1}$ от скорости съема металла Q. Показатель степени m и коэффициент C определяют экспериментально. Для абразивных кругов из электрокорунда и карбида кремния $m = 1{,}6 \div 2{,}0$; в качестве величины C можно в первом приближении принимать меньшие значения удельного износа из табл. 2.74 и 2.75. Данные, приведенные в табл. 2.74 и 2.75, соответствуют обычно принятым скоростям шлифования. Увеличение скорости вращения круга, как правило, приводит к уменьшению удельного износа за исключением некоторых операций по заточке твердосплавного инструмента и шлифованию жаропрочных сталей и сплавов, где эта закономерность может не иметь места.

При шлифовании быстрорежущих и других высоколегированных сталей, а также жаропрочных сплавов кругами из монокорунда удельный износ примерно на 20—50% меньше, чем для электрокорундовых кругов. В табл. 2.76 приведены значения коэффициентов и показателей степеней для расчета удельного износа чашечных алмазных кругов, полученные экспериментальным путем в зависимости от элементов режима резания t, v и v_1, площади контакта круга с деталью F и характеристики инструмента.

Таблица 2.74

Ориентировочные значения удельного износа q абразивных кругов при шлифовании различных материалов

Материал обрабатываемой детали	Характеристика круга			Удельный износ, м³/мм²
	Абразивный материал	Зернистость и твердость	Связка	
Углеродистые конструкционные и инструментальные стали	15А 24А	16, 25, 40 СМ1—СТ1	Керамическая	0,015—0,04
Низколегированные конструкционные стали	24А 33А 37А	16, 25, 40 СМ1—СТ1	То же	0,015—0,05
Высоколегированные конструкционные стали мартенситного класса	24А 33А 37А 44А	16, 25, 40 М3—С1	То же	0,05—0,10
Высоколегированные стали аустенитного класса	44А			0,05—0,20
Высокованадиевые быстрорежущие стали	44А			1,0—3,0
Жаропрочные стали	44А	16, 26 М3—СМ2	То же	0,1—0,5
Серый чугун	63С	16, 25, 40 СМ1—С1	»	0,3—0,6
Жаропрочные сплавы (обдирочное шлифование)	15А	80—120 СТ1—Т2	Бакелитовая	0,1—1,0
Титановые сплавы	63С	25, СМ2—С2	Керамическая	0,8—1,5

Таблица 2.75

Ориентировочные значения удельного износа q алмазных и эльборовых кругов при шлифовании различных материалов

Материал обрабатываемой детали	Характеристика круга			Удельный износ, мг/г
	Материал зерна	Зернистость и твердость	Связка	
Быстрорежущие стали	Эльбор ЛО, ЛП	10, 12, 16 С1—СТ2	Керамическая Органическая Б1	0,3—0,5 0,5—1,5
	Алмаз АСВ	125/100	Органическая Б1	8,0—12,0
Закаленные малолегированные стали	Эльбор ЛО	10, 12	Керамическая Органическая	0,3—2,0 0,5—2,5
	Алмаз АСВ	125/100	Органическая	3,0—10
Титановый сплав	Эльбор ЛО	10, СТ1—СТ2	Керамическая	20—40
Чугун	Эльбор ЛО, ЛП	16	Органическая	1—2
Литые магнитные сплавы ЮНДК24	Эльбор ЛО	10—12, СТ—СТ2	Керамическая	0,5—3,0

Таблица 2.76

Формула, коэффициенты и показатели степеней для расчета удельного расхода круга при алмазном шлифовании

$$q = C_q t^{x_q} v_1^{y_q} v^{z_q} F^{m_q} \prod_{i=1}^{4} K_{qi}$$

Факторы, оказывающие влияние на удельный износ	Коэффициенты и показатели	Связка алмазных кругов												
		Органические			Металлические							Керамические		
		Б1	Б156	ТО2	М54	М58	М5	МИ2	ТМ	М81	1013	К1	К5	К3
Обрабатываемый материал ВК8	C_q	0,055	0,084	0,31	0,08	0,17	0,13	0,14	2,1	0,1	0,03	0,12	0,15	0,14
	x_q	0,98	0,68	0,67	0,31	0,35	0,28	0,21	0,35	0,3	0,6	0,8	0,78	0,8
	y_q	1,01	0,6	0,53	0,36	0,37	0,33	0,23	0,31	0,31	0,7	0,67	0,73	0,87
	z_q	0,63	0,8	0,6	0,41	0,4	0,35	0,28	0,3	0,34	0,6	0,78	0,65	0,5
	m_q	0,87	0,64	0,54	0,45	0,39	0,41	0,31	0,8	0,36	0,63	0,6	0,59	0,71
Охлаждение:	K_{q1}													
с охлаждением		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
без охлаждения		2,44	0,28	0,4	1,8	1,4	1,3	1,2	0,7	1,26	1,3	1,3	1,26	1,4
Концентрация круга:	K_{q2}													
50		1,8	2,51	2,8	—	—	0,62	—	—	—	—	—	—	—
100		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
150		0,87	1,65	1,73	0,97	1,1	1,35	1,26	0,96	1,15	1,1	0,71	0,85	0,6
200		0,78	2,13	1,96	1,13	1,16	1,4	1,31	0,85	1,25	1,3	0,87	0,91	0,8
Марка зерна:	K_{q3}													
АСО		0,85	1,7	1,2	1,35	1,21	1,3	1,4	1,2	1,14	1,18	1,22	1,19	1,2
АСР		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
АСВ		1,31	1,28	0,91	0,32	0,96	0,94	0,98	0,97	0,96	1,05	1,1	1,05	1,16
Зернистость круга:	K_{q4}													
АСО 63/50		1,3	1,1	1,13	—	—	1,1	1,3	1,2	—	—	1,45	1,8	1,7
АСО 80/63		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
АСО 100/80		1,1	0,9	0,93	—	0,9	0,93	1,12	1,05	1,1	—	1,06	1,16	1,1
АСО 125/100		1,2	0,8	0,85	—	0,75	0,85	0,8	0,9	1,85	—	1,18	1,27	1,3
АСО 200/160		1,31	0,76	0,7	—	0,67	0,71	0,67	0,8	1,4	—	1,85	1,71	1,1

Стойкость шлифовального круга. *Момент правки круга для восстановления* его первоначальных режущих свойств и геометрической формы зависит от условий шлифования и технических требований к изделию. Критериями, определяющими необходимость правки круга, могут быть: а) выход размеров изделия за пределы заданной точности, связанный с потерей кругом геометрической формы; б) выход шероховатости поверхности изделия за заданные пределы, вызванный неравномерным износом круга, прогрессирующей волнистостью его рабочей поверхности, усилением вибраций; в) недопустимое повышение температуры шлифования и в связи с этим опасность появления прижогов на поверхности детали или структурных изменений в подповерхностном слое; г) снижение скорости съема обрабатываемого материала, вызванное затуплением круга (в основном это относится к станкам, работающим по принципу постоянной силы прижима шлифующего инструмента к детали).

Возможны следующие способы установления периода стойкости круга: 1) наблюдение оператора за ходом процесса шлифования; 2) обработка пробной партии деталей; 3) измерение интенсивности вибраций; 4) определение эффективной мощности шлифования (или тангенциальной составляющей силы резания P_z); 5) измерение температуры шлифования; 6) измерение радиальной составляющей силы резания P_y для определения коэффициента режущей способности круга $K_\tau = Q/P_y$; 7) измерение скорости съема металла Q (для станков, работающих с постоянной силой прижима к детали). Косвенным признаком затупления может служить и усиление шума шлифования.

В крупносерийном и массовом производствах при шлифовании партии пробных деталей измеряют все интересующие параметры точности и качества обработанных поверхностей и определяют максимальное количество деталей, которое соответствует всем параметрам технических требований на операцию. Определенное таким путем количество деталей, характеризующее период стойкости круга, обычно корректируют в сторону уменьшения, для того чтобы избежать брака при случайных колебаниях припуска на обработку, нестабильности качества шлифовальных кругов и уменьшения стойкости круга по мере его износа.

При измерении интенсивности вибраций датчики устанавливают на центрах круглошлифовального станка (предпочтительнее на заднем центре), вблизи шпинделя на шлифовальной бабке для плоско- и внутришлифовальных станков. Предельная величина амплитуды колебаний может быть использована для автоматической подачи команды на правку круга.

Способ измерения эффективной мощности может быть применен в тех случаях, когда работа круга происходит с явным затуплением, и лимитирующим является появление прижогов на шлифуемой поверхности. Этот способ выгодно отличается простотой измерительной схемы: ваттметр с самописцем или другим регистрирующим прибором подключают к электродвигателю привода шлифовального круга. Однако погрешности, свойственные этому методу, ограничивают его применение.

Изменение коэффициента режущей способности круга K_τ хорошо отражает изменения в ходе процесса шлифования. Коэффициент K_τ отражает способность круга сошлифовывать с детали определенное количество металла в единицу времени с определенной силой, прижимающей круг к детали. При затуплении круга коэффициент режущей способности уменьшается согласно закономерности $K_\tau = K_0 e^{-\lambda\tau}$, где K_0—значение коэффициента в начале шлифования (после правки), а λ — коэффициент, зависящий от условий шлифования. По экспериментальным данным значения K_τ для абразивных инструментов колеблются в пределах 0,03—0,15.

Уменьшение K_τ до определенного значения может быть принято за критерий затупления круга и использовано для подачи сигнала на его правку. Сложность этого способа заключается в том, что, во-первых, в процессе шлифования необходимо измерять сразу две величины (Q и P_y) и, во-вторых, изменение K_τ за период стойкости круга во многих случаях происходит недостаточно заметно, в связи с чем погрешности измерения Q и P_y значительно искажают результат определения K_τ.

Уменьшение скорости съема металла в процессе шлифования, вызванное затуплением круга, может быть использовано в качестве критерия затупления для

станков, работающих с постоянной силой прижима круга к детали. Для станков, работающих по принципу кинематической жесткой размерной подачи, измерения одной только скорости съема металла недостаточно для определения затупления круга. Выбор того или иного способа установления момента затупления круга зависит от конкретных условий обработки и технических требований на деталь. Наиболее существенными факторами, влияющими на период стойкости шлифовального круга, являются вид обрабатываемого материала, режим шлифования, размеры и характеристика круга.

Влияние режима резания на стойкость круга для большинства случаев шлифования можно выразить в виде степенной зависимости

$$T = \frac{C_T}{(QK_c)^n}, \qquad (2.37)$$

где C_T — коэффициент, зависящий от качества обрабатываемого материала, размеров и характеристики круга и других факторов; Q — средняя скорость съема металла, мм³/мин; n — показатель степени, зависящий от условий шлифования; K_c — коэффициент, равный отношению фактической скорости съема металла к теоретической, связанной с режимом обработки (зависит от жесткости системы, радиальной составляющей силы резания и размерного износа круга). Величины C_T, n, K_c определяют экспериментально; они существенно зависят от выбранного критерия стойкости круга. Их ориентировочные значения приведены в табл. 2.77.

Увеличение скорости вращения круга до 60—80 м/с при шлифовании легкообрабатываемых сталей приводит к пропорциональному увеличению периода стойкости круга. С увеличением размеров круга (площади его рабочей поверхности) пропорционально увеличивается количество абразивных зерен (режущих кромок), совершающих полезную работу шлифования, и, следовательно, период стойкости круга.

Следует отметить, что на некоторых операциях шлифования деталей в автотракторной и подшипниковой промышленности абразивный круг не доводят до полного затупления, а правят значительно раньше, снимая минимальный слой абразива и совмещая время на автоматическую правку круга с другими элементами штучного времени на обработку (холостые ходы, установку и снятие детали и т. п.). Такая мера позволяет интенсифицировать режим обработки, получать

Таблица 2.77

Значения коэффициентов и показателя степени в формуле (2.37) при круглом наружном шлифовании различных по обрабатываемости сталей абразивными кругами

Материал обрабатываемой детали	Характеристика круга	C_T	K_c	n
Ст3, 20, 45 (незакаленные)	ПП 400×32×203 24А25С17К5	100—120	0,85—0,95	1,8—2,0
45 (*HRC* 48—52)	ПП 400×32×203	60—80	0,8—0,95	1,5—1,7
12ХН3А (цементованная, закаленная, *HRC* 56—60) ШХ15 (*HRC* 58—60)	24А25С27К5	60—70	0,8—0,95	1,6—1,8
40Х13 (мартенситного класса)	ПП 400×32×203 24А25СМ27К5	14—20	0,7—0,9	1,8—2,0
20Х23Н18 (аустенитового класса)		2—5	0,5—0,8	1,2—1,5
Р18 (*HRC* 60—62)	ПП 400×32×203 24А16СМ17К5	3,5—5,0	0,5—0,7	1,1—1,5
Р9Ф5 (*HRC* 62—64)		0,3—0,5	0,2—0,4	1,1—1,8

Таблица 2.78

Периоды стойкости абразивных кругов при плоском шлифовании деталей из различных материалов

Материал обрабатываемой детали	Размеры и характеристика круга	Съем материала, мм³/мин	Стойкость круга, мин
Сталь 45, 40Х (закаленные)	ПП 250×20×75 24А40СМ26К5	200—500	40—60 15—60
ШХ15 (закаленная)		150—200	20—30
Титановый сплав	ПП 250×25×75 63С25С17К5	500	15—20
ЖС6-К	ПП 250×25×75 44А25С16К5	200—500	10—20
Р6М5	ПП 250×25×75 24А40СМ1, М36К5	200—300	6—10

более стабильную точность и качество детали, а также в некоторой степени уменьшать вредное влияние нестабильности качества абразивного инструмента. С другой стороны, частая правка кругов не позволяет полностью использовать его режущие свойства.

В табл. 2.78 приведены периоды стойкости абразивных кругов при плоском шлифовании различных материалов, а в табл. 2.79 показатели и коэффициенты для расчета стойкости алмазных чашечных кругов при плоском шлифовании деталей из твердых сплавов.

Методика определения расхода шлифовальных кругов. Расход шлифовального круга зависит от износа в процессе шлифования и процесса правки. Если круг работает без правки до полного износа, то расход и износ круга совпадают. В этом случае для определения расхода шлифовального круга достаточно знать величину его удельного износа. Расход круга на обработку одной детали здесь пропорционален объемному припуску на шлифование. При работе с периодическими правками расход зависит от износа круга в процессе шлифования и толщины слоя, удаляемого при правке.

Износ круга $h_и$ в направлении, перпендикулярном к его рабочей поверхности, обычно колеблется в пределах 10—50 мкм за время, равное периоду стойкости T. Большие значения износа относятся к мягким кругам (СМ1 и мягче). При наиболее благоприятных условиях шлифования общая минимальная толщина слоя абразива, снимаемого при правке, $h_{пр} = 15$ мкм; при менее благоприятных, но нормальных условиях шлифования, $h_{пр} = 100$ мкм.

Величина объемного расхода круга на обработку одной детали может быть определена по формуле

$$q_0 = \pi DHh/N,$$

где D — средний диаметр рабочей поверхности круга, равный полусумме диаметров между двумя правками, мм; H — высота рабочей поверхности круга, мм; h — изменение радиуса круга вследствие износа и расхода на одну правку, мм; N — количество деталей, обработанных за период стойкости круга между двумя правками

Зная величину объемного расхода круга на обработку одной детали и наименьший допустимый диаметр полностью изношенного круга, легко рассчитать требуемое количество кругов для выполнения заданной программы.

Таблица 2.79

Формула, коэффициенты и показатели степеней для расчета стойкости круга при алмазном шлифовании

$$T = C_T t^{x_T} v_1^{y_T} v^{z_T} F^{m_T} \prod_{i=1}^{4} K_{Ti}$$

Параметры, оказывающие влияние на T	Коэффициенты и показатели степени	Связка алмазного круга												
		Органическая			Металлическая							Керамическая		
		Б1	Б156	ТО2	М54	М58	М5	МИ2	ТМ	М81	МО13	К1	К5	К6
Обрабатываемый материал ВК8	C_T	15,15	43,2	36,2	23,1	9,76	30,5	11,75	25,2	32,4	7,95	9,7	9,6	11,7
	x_T	−0,3	−0,56	−0,5	−0,27	−0,55	−0,55	−0,6	−0,31	−0,5	−0,7	−0,51	−0,57	−0,53
	y_T	−0,26	−0,45	−0,48	−0,44	−0,5	−0,38	−0,65	−0,25	−0,37	−0,57	−0,4	−0,42	−0,5
	z_T	0,5	0,4	0,42	0,6	0,7	0,26	0,6	0,31	0,31	0,63	0,45	0,53	0,6
	m_T	0,31	0,5	0,47	0,4	0,36	0,35	0,32	0,38	0,4	0,35	0,23	0,28	0,36
Охлаждение:	K_{T1}													
с охлаждением		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
без охлаждения		—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
		0,78	0,85	0,87	0,23	0,3	0,24	0,4	0,16	0,5	0,6	0,61	0,7	0,56
Концентрация круга:	K_{T2}													
50		—	—	—	—	—	0,65	—	—	—	—	—	—	—
100		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
150		0,9	1,1	1,2	1,2	1,3	1,31	1,1	1,1	1,2	1,3	1,1	1,16	1,2
200		0,7	0,8	0,9	1,4	1,6	—	0,91	1,26	1,3	1,4	0,9	0,87	0,96
Марка зерна:	K_{T3}													
АСО		1,2	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
АСР		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
АСВ		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Зернистость круга:	K_{T4}													
АСО 63/50		—	—	—	—	—	0,84	—	—	—	—	—	—	—
АСО 80/63		1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
АСО 100/80		1	1	1	1	1	1,12	1	1	1	1	1	1	1
АСО 160/125		1,2	1,1	1,1	—	—	1,34	—	—	—	—	—	—	—

§ 2.9. Правка кругов и правящий инструмент

Для восстановления режущей способности абразивного инструмента и придания ему правильной геометрической формы и профиля периодически в процессе работы производят его правку. От правильного выбора средств и режимов правки зависят не только точность и шероховатость обработанной поверхности детали, производительность обработки, но и расход шлифовальных кругов, износостойкость правящего инструмента и себестоимость операции шлифования.

Широко применяемые шлифовальные круги зернистостью 25—40 и твердостью СМ2-СТ2 в основном расходуются не в процессе шлифования, где износ их крайне мал, а в процессе правки. На правку расходуется от 45 до 80% полезного объема абразивных кругов при круглом, плоском и внутреннем шлифовании. Затраты времени на правку могут достигать 40% штучного времени обработки и более. В зависимости от требований к точности и шероховатости обрабатываемой поверхности применяют алмазную и безалмазную правку кругов.

Правку осуществляют обтачиванием алмазным инструментом, обкатыванием абразивными, твердосплавными и металлическими дисками, шлифованием кругами из карбида кремния и алмазно-металлическими роликами, тангенциальным точением профильной поверхности круга алмазным инструментом, накатыванием стальными профильными роликами.

Правка методом обтачивания представляет собой точение (разрушение) хрупкого абразивного материала и связки шлифовального круга правящим алмазным инструментом высокой твердости. Правка осуществляется либо отдельными сравнительно крупными алмазными зернами, зачеканенными в оправки (ОСТ 2-9—70 «Алмазы в оправках» и ГОСТ 17564—72 «Иглы алмазные»), либо алмазно-металлическими карандашами диаметром 8—10 мм.

Наибольшее применение имеют алмазно-металлические карандаши, в которых в определенном порядке размещены кристаллы алмазов, прочно соединенные специальным сплавом. Этот сплав имеет близкий к алмазу коэффициент теплового расширения, поэтому при изменениях температуры алмазно-металлического карандаша в процессе правки алмазы не испытывают дополнительных тепловых деформаций. Алмазно-металлические карандаши выпускают четырех типов в зависимости от расположения и характеристики алмазных кристаллов в рабочей части: Ц — с алмазами, расположенными цепочкой вдоль оси карандаша (рис. 2.33, *а*); С — с алмазами, расположенными слоями, неперекрывающимися (рис. 2.33, *б*) и перекрывающимися (рис. 2.33, *в*); Н — с неориентированным расположением алмазов (рис. 2.33, г). Каждый тип карандашей подразделяют на марки, отличающиеся массой и количеством алмазов, а также размерами вставки и оправы. Марки карандашей различных типов приведены в табл. 2.80.

Карандаши типа Ц изготовляют из высококачественных кристаллов алмазов массой от 0,03 до 0,5 карата. Они имеют наибольшее применение при правке кругов для круглого, бесцентрового внутреннего и фасонного шлифования. Карандаши типа С выпускают двух марок: многозернистые с количеством до 10 сравнительно мелких алмазных зерен в слое и малозернистые с двумя—пятью алмазными зернами массой 0,1—0,2 карата. Эти карандаши обладают повышенной износостойкостью; их используют для правки абразивных кругов при чистовом шли-

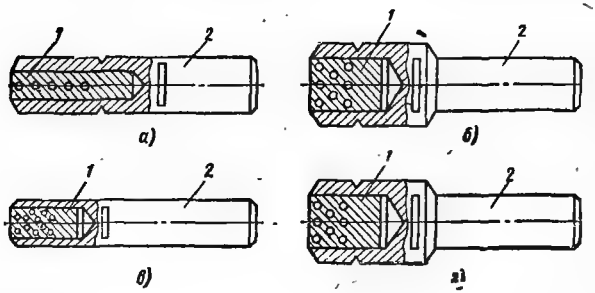


Рис. 2.33. Алмазные карандаши:

а — тип Ц; *б* — тип С с неперекрывающимися слоями алмазов; *в* — тип С с перекрывающимися слоями алмазов; *г* — тип Н; *1* — алмазоносная вставка; *2* — оправка

Таблица 2.80

Правящие алмазно-металлические карандаши

Тип	Марка	Масса отдельных кристаллов (в каратах) или зернистость	Общая номинальная масса алмазов в каратах	Количество алмазов в слое
Ц	1 2 * 3	От 0,03 до 0,05 Св. 0,05 » 0,10 » 0,05 » 0,10	0,5	1
	4 5	Св. 0,10 до 0,20 От 0,20 » 0,50	1,0	
	6	От 0,31 до 0,50	Фактическая масса	
С	1 2 3	0,017—0,025 0,05—0,10 0,05—0,10	1	12—14 4—5 —
	4 5	Св. 0,10 до 0,2 0,11—0,2	2 1	2—4 5—7
Н	1 2 3 4 5 6 7	А8 А12 А16 А25 А40 А50 0,0025—0,0080	1	Не регламентировано

* Алмазно-металлические карандаши марки Ц2 изготовляют из кристаллов алмаза, имеющих удлиненную форму. Допускаемое отклонение массы от общей массы алмазов составляет ±0,02 карата.

фовании в автоматическом цикле. Карандаши типа Н изготовляют из алмазов различного качества, в том числе из дробленых и колотых, и используют для правки мелкозернистых шлифовальных кругов на операциях круглого и бесцентрового шлифования, а также для правки однониточных резьбошлифовальных, тарельчатых и плоских кругов для зубошлифования и шлицешлифования.

В процессе правки алмазно-металлические карандаши изнашиваются, на их рабочих поверхностях образуются площадки, и поэтому карандаши обычно устанавливают так, чтобы их ось была наклонена под углом 10—15° в сторону вращения круга и развернута к направлению движения подачи. Это позволяет периодически поворачивать правящий инструмент вокруг оси, вводя тем самым в работу незатупившиеся грани алмаза, что способствует улучшению условий работы правящего инструмента и снижению его износа. Такая установка алмазных инструментов предохраняет также алмаз от перегрузок и разрушения кристаллов и исключает вибрации в системе станок—круг—алмаз.

Для правки кругов больших размеров, а также при профильном шлифовании применяют алмазы больших размеров в оправках, представляющие собой стальную державку, в которой закреплен необработанный алмаз с острой вершиной. Алмазы с естественными гранями, закрепленные в оправах, имеют преимущество перед алмазно-металлическими карандашами в том, что их изготовляют из более качественных алмазов, и, следовательно, их износостойкость значительно выше. Оправы для алмазов изготовляют цилиндрическими, ступенчатыми, коническими и с резьбой. Для закрепления алмазов в оправах применяют механический зажим, пайку, чеканку. Установка алмаза в оправе должна быть осуществлена таким образом, чтобы плоскости сколов кристаллов не совпадали с на-

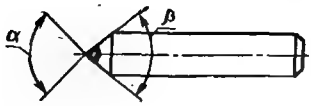


Рис. 2.34. Иглы алмазные

правлением сил, действующих на алмаз при правке. После закрепления алмаз должен выступать из оправки не более чем на 1/4 своей длины.

Специально для правки однониточных разьбошлифовальных кругов в соответствии с ГОСТ 17564—72 промышленность выпускает алмазные иглы (рис. 2.34, табл. 2.81).

Для изготовления игл применяют природные алмазы в виде октаэдрических, пиленых и колотых кристаллов. Рабочую часть игл гранят по форме четырехгранной пирамиды без видимой при десятикратном увеличении перемычки на вершине. Алмаз крепят в державке пайкой серебряным припоем марки ПСр50Кд, либо другим припоем или методом, обеспечивающим необходимую прочность при исключении графитизации алмаза. Державки для игл изготовляют из стали марок 20, 25, 30, 35, 40.

Стоимость ограненных алмазных инструментов выше стоимости алмаза в оправах, так как кристалл алмаза шлифуют. Однако высокая производительность правки кругов, а также повышение точности шлифования во многих случаях оправдывают расходы на изготовление правящего инструмента.

Правка кругов методом обтачивания позволяет получить высокую точность рабочей поверхности круга, которая за счет изменения величины продольной подачи алмазного инструмента может обеспечить различную шероховатость обрабатываемой детали. В процессе правки кругов методом обтачивания возникают силы, не превышающие 3—5 кгс и способствующие меньшему разрушению абразивных зерен круга при правке и их износу при шлифовании

В табл. 2.82 приведены рекомендации по выбору режимов правки шлифовальных кругов алмазами и алмазно-металлическими карандашами.

Правка методом обкатывания представляет собой процесс дробления и скалывания абразивных зерен на рабочей поверхности круга правящим инструментом, получающим вращение вследствие сил трения от шлифовального круга

В качестве правящих инструментов при методе обкатывания применяют круги из карбида кремния КЧ80ВТ—ЧТК, стальные диски, звездочки и шарошки твердосплавные монолитные ролики, крупнозернистые твердосплавные ролики на металлической связке. Под действием режущей кромки правящего инструмента, перемещающейся по образующей шлифовального круга с определенной скоростью, поверхностный слой связки круга разрушается, выступающие

Таблица 2.81

Алмазные иглы

Условное обозначение иглы	Основные размеры				
	Диаметр оправки, мм	Длина, мм	Угол при вершине иглы α ±10, град	Угол при вершине оправки β ± 10, град	Исходная масса алмаза, карат
3908-0031 3908-0032	6	35±0,5	60—90	50	0,10—0,20
3908-0033 3908-0034	8	35±0,5	60 90	50 80	
3908-0035 3908-0036	9,5	50±0,5	60 90	50 80	0,21—0,25

Примечание. Иглы с углом α = 60° изготовляют по требованию заказчика.

Таблица 2.82

Режим правки абразивных кругов методом обтачивания

Вид шлифования	Шероховатость поверхности шлифуемой детали *Ra*, мкм	Режим правки							
		алмазом				алмазно-металлическим карандашом			
		Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв. ход	Число проходов		Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв. ход	Число проходов	
				рабочих	выхаживающих			рабочих	выхаживающих
Круглое наружное	0,32—1,25	0,3	0,02	6	4	0,4	0,03	4	4
Бесцентровое плоское	0,080—0,32	0,2	0,01	5	4	0,3	0,02	3	4
Внутреннее	0,32—1,25	1,0	0,02	6	4	1,5	0,03	4	4
Резьбошлифование	0,16—0,63	0,2	0,005	6	2	—	—	—	—
Шлицешлифование	0,32—1,25	0,3	0,03	4	4	0,4	0,03	4	4
	0,16—0,32	0,2	0,01	5	4	0,3	0,02	3	4
Профильное	0,32—1,25	0,2	0,02	6	4	0,3	0,03	4	4
	0,16—0,32	0,1	0,01	8	4	0,2	0,02	4	4

зерна выкрашиваются, а зерна, находящиеся более глубоко в связке, раскалываются на части. Проскальзывание между шлифовальным кругом и правящим инструментом приводит к заглаживанию абразивных зерен на выправляемой поверхности круга. При правке методом обкатывания возможны две ориентации правящего инструмента относительно шлифовального круга: оси вращения шлифовального и правящего инструментов находятся либо в одной плоскости ($\varphi = 0$), либо в пересекающихся плоскостях, расположенных под углом $\varphi \neq 0$. С увеличением угла φ в зоне правки увеличиваются разрушающие силы, действие которых интенсифицирует процесс восстановления рабочей поверхности круга, и повышается износ правящего инструмента.

Правку кругов методом обкатывания безалмазными правящими инструментами чаще всего применяют как предварительную правку, когда необходимо снять большой слой абразива с недостаточно хорошо сбалансированного круга и при наличии неравномерности снимаемого слоя абразива. При такой правке используют стальные диски, звездочки и шарошки (ГОСТ 4803—67), устанавливаемые в специальные правящие приспособления.

Следует обратить внимание на правку шлифовальных кругов дисками (рис. 2.35, *а*, *б*), изготовляемыми в исполнениях а и б из сталей марок 10, 20 и 30, цементуемых на глубину 0,3—0,5 мм и закаливаемых до твердости *HRC* 55—60. Наличие у этих дисков мягкого незакаленного слоя материала способствует ин-

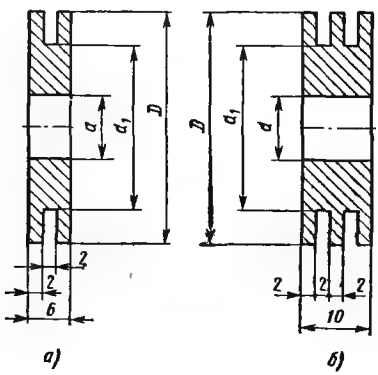


Рис. 2.35. Диски металлические для правки шлифовальных кругов

Диски для правки шлифовальных кругов

Таблица 2.83

Условное обозначение дисков	Размеры мм		
	D	d	d_1
7967-0,001 -0,002	50	14	35
7967-0,003 -0,004	70	28	46

тенсификации процесса правки. Правящие диски, размеры которых приведены в табл. 2.83, применяют для правки кругов, используемых при чистовом и получистовом шлифовании, когда требуется получить шероховатость обработки в пределах $Ra = 0{,}63 \div 2{,}50$ мкм.

В табл. 2.84 приведены рекомендуемые режимы правки шлифовальных кругов методом обкатывания. Для интенсификации процесса правки кругами из карбида кремния следует устанавливать ось правящего инструмента под углом $\varphi = 8 \div 10°$ по отношению к оси шлифующего круга. В остальных случаях инструменты осуществляют правку кругов при параллельных осях. Обычно после рабочих ходов производят два—четыре выхаживающих хода.

Правка методом шлифования представляет собой процесс срезания и дробления абразивных зерен вращающимся правящим инструментом, который получает принудительное вращение от самостоятельного привода или от привода шлифовальной бабки станка. В качестве правящего инструмента применяют алмазные ролики на твердосплавной связке (ГОСТ 16014—70) и круги из карбида кремния высокой твердости (ГОСТ 6565—67). При рассматриваемом методе вследствие разности скоростей вращения шлифовального круга и правящего инструмента происходит скалывание частичек абразивных зерен, а иногда выкрашивание целых зерен. Для этого вида правки все большее применение находят алмазные ролики, получающие принудительное вращение, совпадающее по направлению с вращением шлифовального круга или направленное против него. Согласно ГОСТ 6565—67 для правки кругов методом шлифования применяют круги из карбида кремния на керамической связке формы ПП с характеристикой и размерами, приведенными в табл. 2.85.

Алмазные ролики для правки абразивных кругов согласно ГОСТ 16014—70 изготовляют из природных алмазов с равномерным их расположением на рабочей поверхности ролика. Ролик (рис. 2.36) состоит из корпуса *1*, изготовленного из

Таблица 2.84

Режимы правки абразивных шлифовальных кругов методом обкатывания

Правящий инструмент	Продольная подача, мм/мин	Номер зернистости шлифовального круга					
		40	25	16	40	25	16
		Поперечная подача, мм/ход			Число рабочих ходов		
Круг из карбида кремния	1,0	0,04—0,02	0,03—0,02	0,02—0,01	3—2	2	3—2
Диск: твердосплавный	0,5—1,0	0,03—0,02	0,02—0,01	0,02—0,01	4—2	3—2	2
монолитный стальной	1,0—1,5	0,04—0,05	0,02—0,01	0,02—0,01	2	2	2

стали марки 35 или 45, и алмазоносного слоя *2*, прочно соединенного с корпусом. Алмазоносный слой содержит алмазы, сцементированные специальной твердосплавной связкой методом порошковой металлургии. Размеры роликов и характеристика алмазного слоя приведены в табл. 2.86.

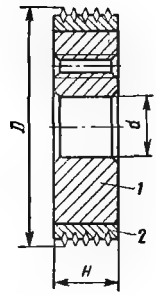


Рис. 2.36. Ролики алмазные для правки шлифовальных кругов

Все шире начинают применять алмазные ролики, позволяющие осуществлять правку кругов по нескольким рабочим поверхностям: прямолинейным, криволинейным и их сочетаниям. Такая правка позволяет значительно повысить производительность шлифования за счет концентрированной одновременной обработки нескольких поверхностей детали, а также в результате сокращения времени, затрачиваемого на правку круга, которая ведется либо роликом сложного фасонного профиля, либо набором роликов с использованием метода врезания или метода продольной подачи. Алмазные правящие ролики сложного профиля применяют, в частности, на автомобильных заводах для автоматической правки абразивных кругов. Следует стремиться использовать приспособления для правки с самостоятельным приводом, устанавливаемым вне рабочей зоны станка — за задней бабкой, на шлифовальной бабке или позади нее. Это позволяет править круг во время установки и снятия детали, что сводит до минимума затраты времени на правку.

Для облегчения изготовления ролики делают из двух частей; на требуемый осевой размер детали их устанавливают с помощью распорной втулки. Наличие разреза ролика по плоскости, наклонной к его оси, исключает появление при правке на шлифовальном круге канавок и других дефектов.

Правку методом шлифования осуществляют на кругло- и бесцентрово-шлифовальных станках, а также на специальных станках (например, для шлифования шеек коленчатых валов и кулачков распределительных валов). Применение алмазных роликов и специальных правящих приспособлений позволяет сократить время на правку, а в некоторых случаях совершенно ее исключить и, таким образом, повысить производительность труда при обработке на 20—30%.

При правке кругов алмазными роликами методом шлифования возникают меньшие силы, чем правка кругами из карбида кремния. Алмазные ролики способствуют получению высокой точности выправленной поверхности шлифовальных кругов и их рациональному расходу при шлифовании.

В табл. 2.87 приведены режимы правки шлифовальных кругов алмазными роликами и кругами из карбида кремния с продольной подачей и врезанием.

Таблица 2.85

Круги из карбида кремния для правки шлифовальных кругов

Размеры, мм			Зернистость при твердости		
D	*H*	*L*	Т	ВТ	ЧТ
63 (60)	20; 32	20	80; 50	80—50	150
80	20; 25 32	32		125; 80	
100	20; 32	20			160; 125; 80
125	32	32; 51 (50)			
150	32	32; 51 (50)	—	125; 80; 50	

Примечание. Размеры кругов, указанные в скобках, применять не рекомендуется.

Таблица 2.86

Размеры алмазных правящих роликов

Условное обозначение ролика	$D^{-0,05}$, мм	$d^{+0,013}$, мм	H, мм	Масса одного кристалла алмаза карат	Количество алмазов в ролике, шт.
3908-0,001 *	69,85	19,05	$20^{-0,52}$	0,008—0,010	1200
3908-0,002	70,00	20,00		0,006—0,008	1540
3908-0,003	70,00	20,00	$10^{-0,36}$	0,008—0,010	600

* Ролики используют только для станков зарубежных фирм.

Таблица 2.87

Режимы правки абразивных кругов методом шлифования

Вид правящего инструмента	Характеристика шлифовального круга			Операция шлифования	Скорость вращения инструмента м/с	Подача			Примечание
	Зернистость	Твердость	Связка			продольная, м/мин	поперечная мм/ход	поперечная мм/мин	
Алмазные ролики	12—40	До Т2	К, Б, В	Окончательная	10,0	0,3—1,0	0,02	—	Правка с продольной подачей
	12—25	До СТ1	К, Б		10,0	—	—	0,5—0,3	Правка с врезной подачей
Круги из карбида кремния твердостью:									
Т1—Т2	40—50	СМ2	К, Б	Предварительная	0,5—1,0	1,0—1,5	0,05	—	Правка с продольной подачей
ВТ1—ЧТ2	40—50	СТ1		»		1,0—1,5	0,05		
Более ЧТ2	40—50	СТ3		»		1,0—1,5	0,05		
Т1—Т2	12—40	СМ2		Окончательная		0,5—1,0	0,03		
ВТ1—ВТ2	12—40	СТ1		»		0,5—1,0	0,03		

Правка методом тангенциального точения представляет собой процесс, аналогичный процессу обтачивания. Правку осуществляют путем срезания (отчасти скалывания и выкрашивания) абразивных зерен алмазным бруском. Операцию выполняют на плоскошлифовальных станках по всей рабочей поверхности круга при продольном перемещении стола. Брусок с профилем, соответствующим профилю шлифуемой детали, закрепляют на столе станка за деталью. Шлифовальный круг при каждой подаче на глубину приводят в соприкосновение с фасонной поверхностью бруска. В результате взаимодействия с бруском постоянно обновляется профиль круга и тем самым обеспечивается высокое качество обрабатываемых поверхностей деталей, точность размеров и стабильность обрабатываемого профиля.

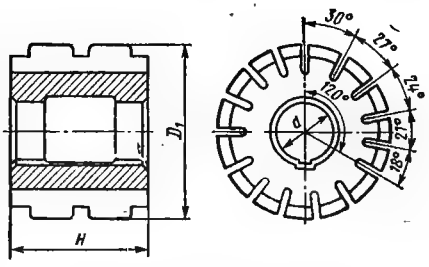


Рис. 2.37. Накатной ролик для правки фасонных шлифовальных кругов

При использовании профильных алмазных брусков на шлицешлифовальных и специальных станках (например, на станках для шлифования елочного замка турбинных лопаток) производительность операций значительно повышается за счет исключения времени на правку.

Правка методом накатывания рабочей поверхности круга представляет собой процесс дробления абразивных зерен и связки при относительно медленном вращении металлического накатного ролика и круга. Метод применяют исключительно для правки профильных шлифовальных кругов. Правящим инструментом служит фасонный стальной ролик, имеющий профиль обрабатываемой детали. Профилирование ведут при скорости накатывания 1—1,5 м/с с поперечной подачей 0,05—0,06 мм/мин. В зависимости от конструктивных особенностей станка вращение при накатке получает либо шлифовальный круг, либо ролик. В результате взаимного вращения ролика с кругом и значительного давления, создаваемого в зоне контакта поперечной подачей, происходит разрушение абразивных зерен и связки на рабочей поверхности круга. Правка продолжается до тех пор, пока круг не приобретает форму профиля заданной детали. Износ ролика вследствие незначительного относительного скольжения при правке сравнительно невелик, поэтому одним и тем же роликом можно многократно производить правку. Предпочтительнее осуществлять накатывание роликом, который приводится во вращение от отдельного электродвигателя или от шпинделя бабки изделия, так как при этом обеспечивается большая точность профилирования круга при меньшем износе ролика.

Профилирование кругов накатными роликами отличается простотой конструкции приспособлений, возможностью правки по нескольким поверхностям профиля круга, высокой режущей способностью выправленных поверхностей.

Для изготовления роликов применяют стали марок 45, 40Х с закалкой до твердости *HRC* 30—32, а также У8А, У10А, ХГ, Р18, закаленные до твердости *HRC* 60—64. Профилирование роликами из стали 45, 40Х более эффективно для операций предварительного шлифования, так как процесс накатывания круга протекает интенсивнее, а изготовление роликов проще. Хотя закаленные до твердости *HRC* 60—64 ролики более износоустойчивы и обеспечивают повышенную точность профилирования круга, для их изготовления необходимы специальные профилешлифовальные станки.

На рис. 2.37 приведена конструкция накатного ролика с параллельными оси канавками неравномерного шага. Наличие канавок интенсифицирует процесс профилирования круга, а неравномерный шаг их расположения исключает появление на круге следов от канавок, а также биение круга после правки. Диаметр ролика выбирают в зависимости от диаметра круга $D_1 = (0{,}2 \div 0{,}25)\,D$, а его ширина H должна соответствовать длине профиля.

Таблица 2.88

Режимы профилирования фасонных шлифовальных кругов накатными роликами

Правящий инструмент	Характеристика шлифовального круга		Операция шлифования	Режим правки	
	Зернистость	Твердость		Скорость, м/с	Поперечная подача, мм/мин
Стальной ролик твердостью:					
HRC 30—32	16—40	М3—СМ2	Предварительная	0,5	0,05
HRC 60—64	16—М20	М3—СТ1	Окончательная	1,0—1,5	0,05—0,01

Примечание. Режимы профилирования даны для круга с керамической связкой.

Правку накатными роликами производят как с охлаждением, так и без него. В последнем случае процесс правки идет несколько быстрее, так как канавки ролика не засоряются разрушаемыми частицами круга.

Метод накатывания рабочей поверхности кругов применяют при многониточном резьбошлифовании, шлифовании зубчатых колес абразивным червяком, при фасонном шлифовании и шлицешлифовании В табл. 2.88 приведены ориентировочные режимы профилирования кругов накатными роликами. При правке указанных в табл. 2.88 кругов давление на круг составляет около 8—10 кгс/см².

При правке шлифовального круга тем или иным способом с его рабочей поверхности периодически снимается слой затупившихся абразивных зерен, связки и налипшего металла. Толщину этого слоя определяют в зависимости от требования на исправление геометрической формы и микропрофиля рабочей поверхности круга. Часто толщину h снимаемого при правке слоя устанавливают в несколько раз большей, чем это необходимо для восстановления режущих свойств и формы рабочей поверхности круга. При повышенном значении h не только излишне расходуются шлифовальные круги и правящий инструмент, но в значительной степени увеличивается время правки. Установление рациональной величины h позволяет повысить срок службы шлифовального круга и правящего инструмента и улучшить технико-экономические показатели операции шлифования

Минимальная, но достаточная толщина слоя абразива, снимаемая при правке,

$$h = h_1 + h_2 + h_3 + h_4,$$

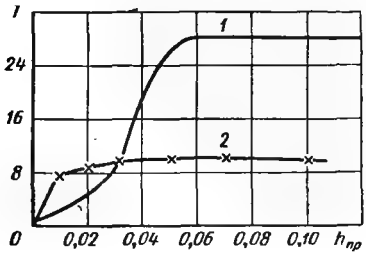
где h_1 — величина биения круга при вращении; h_2 — высота волнистости на круге, возникающая вследствие его неравномерного износа из-за вибраций, мкм; h_3 — разновысотность затупленных вершин абразивных зерен на рабочей поверхности круга, мкм; h_4 —закругление крайних участков рабочей поверхности круга, нарушающее прямолинейность образующей, мкм

Величина h_1 зависит от балансировки круга и зазоров в подшипниках шпинделя шлифовальной бабки; для круглошлифовальных станков классов точности Н и П при чистовом и получистовом шлифовании кругами, имеющими степень неуравновешенности в пределах нормы и твердость не меньше СМ1 (для керамических связок), эта величина колеблется в пределах $h_1 = 5 \div 30$ мкм. Величину h_2 определяют по максимальной высоте волн на рабочей поверхности круга. Для кругов на керамической связке $h_2 = 5 \div 60$ мкм, причем меньшие значения h_2 относятся к кругам твердостью С1 и выше, а большие к кругам твердостью СМ1-М3. Величина h_3 при получистовом и чистовом шлифовании кругами средних зернистостей (16, 25, 40) составляет $h_3 = 5 \div 15$ мкм.

Величина h_4 зависит от конкретных требований к кромкостойкости круга (предельные значения радиусов закругления кромки берут из чертежа обрабатываемой детали). Если шлифование выполняют на проход и кромкостойкость не оказывает непосредственного влияния на размер детали, то $h_4 = 0$.

Рис. 2.38. Зависимость стойкости T шлифовальных кругов различной зернистости от величины слоя $h_{пр}$, удаляемого при правке:

1 — круг зернистостью 40;
2 — круг зернистостью 16



На рис. 2.38 приведены результаты наблюдений за стойкостью шлифовальных кругов в зависимости от величины слоя, удаленного при правке. Для восстановления режущих свойств шлифовального круга зернистостью 40 достаточно снять слой толщиной 0,05—0,07 мм, а круга зернистостью 16 — слой 0,03—0,04 мм. Удаление слоя большей толщины не улучшает условий шлифования и поэтому совершенно излишне.

При чистовом шлифовании износ круга зависит от вида правящего инструмента и режимов правки. Износ круга при шлифовании после правки алмазными инструментами и абразивными кругами меньше, чем при правке металлическими инструментами. Разрушающие силы, возникающие при правке алмазным инструментом, действуют на меньшую глубину и тем самым в меньшей степени нарушают структуру поверхностного слоя шлифовального круга. Зависимость радиального износа круга h_4 от вида правки и среднего размера зерна d (мм) имеет вид

$$h_4 = 0{,}05Kd,$$

где K — коэффициент износа круга при правке различными инструментами.

Средние значения коэффициента K приведены ниже.

Способ правки	Кругом КЧ80ВТ1	Стальным диском	Твердосплавным диском	Алмазным инструментом
Значение K	1,8	2,5	2,2	1,0

Более интенсивный износ шлифовального круга после правки металлическим инструментом приводит к увеличению волнистости на режущей поверхности круга и соответственно к снижению его стойкости между правками.

Общий расход шлифовального круга при правке и шлифовании составляет $h = h_{пр} + h_{шл}$. При правке алмазным инструментом $h = 0{,}25d$; при правке кругами из карбида кремния $h = 0{,}29d$; при правке стальными дисками $h = 0{,}32d$.

Таким образом, применение алмазных инструментов для правки кругов при чистовом шлифовании и рациональная толщина слоя, снимаемого при правке, повышают срок службы шлифовальных кругов и технико-экономические показатели операции шлифования.

Рекомендуемые режимы правки шлифовальных кругов с учетом рационального съема абразива с поверхности круга, а также компенсации износа правящего инструмента приведены в табл. 2.82, 2.84 и 2.87.

§ 2.10. Режимы абразивного и алмазного шлифования

Исходными данными для определения режима резания при шлифовании являются: а) сведения об обрабатываемом материале и размерах шлифуемой поверхности; б) припуск на обработку; в) требования к точности, шероховатости обработанных поверхностей и другим показателям качества; г) сведения о станке; д) жесткость системы станок—деталь—приспособление—круг и е) характеристика круга, которым проводят обработку на данной операции.

Режим резания при наиболее часто встречающихся видах шлифования определяют величинами, приведенными в § 2.1

Режимы резания при шлифовании могут быть определены расчетным путем или назначены на основе практических рекомендаций. Расчет режима шлифования целесообразно проводить для условий массового производства, когда незначительные отклонения от оптимальных условий обработки могут привести к существенным потерям. Расчет режимов целесообразно также проводить при разработке различных нормативов и рекомендаций, относящихся к использованию шлифовальных инструментов.

Методика расчета режима резания при шлифовании

Задача определения оптимального режима шлифования выполняется в три этапа: 1) составление системы уравнений, описывающих технические ограничения, налагаемые на режим резания требованиями к детали, станком, инструментом и условиями производства; 2) математическое описание целевой функции, т. е. функции выражающей цель оптимизации; 3) совместное рассмотрение технических ограничений и целевой функции и определение на этой основе оптимального режима шлифования.

Математические выражения, описывающие технические ограничения, однотипны и могут быть представлены в виде неравенств

$$z^* \gtreqless z\,(v,\ v_1,\ t\ldots),$$

в левой части которых приведено заданное (предельное) значение какой-либо ограничивающей величины или параметра z^*, а в правой — фактическое значение этой величины или параметра при той или иной комбинации элементов режима резания и других заданных условий обработки.

Технические ограничения, налагаемые на режим резания требованиями к изделию, следующие: а) предельно допустимая высота шероховатости Ra^* на обработанной поверхности; б) требуемая точность детали после шлифования (допуск δ^*); в) температура шлифуемой поверхности θ^*_{max}, предельно допустимая с точки зрения прижогов, остаточных напряжений или других качеств поверхностного слоя детали Математические выражения, описывающие ограничения:

по шероховатости обработанной поверхности (ТИ1)

$$Ra^* \geqslant Ra\,(v,\ v_1,\ t\ldots); \tag{2.38}$$

по точности детали (ТИ2)

$$\delta^* \geqslant \frac{P_y}{aJ}, \tag{2.39}$$

где a — часть допуска, которая может быть использована на погрешности, связанные с прогибом детали и отжимом круга; J — жесткость системы станок — приспособление — круг — деталь, кгс/мм,

$$\delta^* \geqslant \frac{6\sigma\,(v,\ v_1,\ t\ldots)}{1-a}, \tag{2.40}$$

где $\sigma\,(v,\ v_1,\ t\ldots)$ — среднее квадратичное значение погрешностей, вызванных случайными причинами при данном режиме резания;

по предельной температуре θ^*_{max}, допустимой с точки зрения отсутствия прижогов, заданной картины остаточных напряжений или других качеств поверхностных слоев детали ТИ3,

$$\theta^*_{max} \geqslant \theta_{max}\,(v,\ v_1,\ t\ldots). \tag{2.41}$$

Для конкретизации значений, входящих в правые части выражений, описывающих ограничения ТИ1—ТИ3, могут быть использованы приведенные выше теоретические или экспериментальные формулы.

Технические ограничения, налагаемые на режим резания станком, следующие: а) мощность привода шлифовального круга N^*; б) наибольшие и наименьшие ча-

стоты вращения шпинделей и значения подач, предусмотренные кинематикой и конструкцией соответствующих механизмов станка (n^*_{max}, n^*_{min}, $v^*_{1\,max}$ и $v^*_{1\,min}$ и т. д.). Ввиду малых значений сил, возникающих при шлифовании, прочность механизмов станка, как правило, не ограничивает режим резания. Исключениями могут быть случаи обдирочного шлифования и обработки деталей на станках с одновременным шлифованием несколькими кругами. Математические выражения, описывающие ограничения по мощности привода шлифовального круга (ТС1),

$$N^* \geqslant \frac{P_z v}{102\eta_c}, \tag{2.42}$$

или

$$N^* \geqslant \frac{N_{эф}}{\eta_c},$$

где η_c — КПД механизма привода круга; по частоте вращения шпинделя (ТС2)

$$n^*_{max} \geqslant \frac{1000v}{\pi D} \geqslant n^*_{min}; \tag{2.43}$$

по скорости подач (ТС3)

$$v^*_{1\,max} \geqslant v_1 \geqslant v^*_{1\,min}; \tag{2.44}$$

$$s^*_{2\,max} \geqslant s_2 \geqslant s^*_{2\,min}. \tag{2.45}$$

Для конкретизации значений, входящих в выражения для ограничений ТС1—ТС3, требуются паспортные данные станка, а также сведения о силах резания и мощности, получаемые на основе теоретико-экспериментальных или экспериментальных данных.

Технические ограничения, налагаемые на режим резания шлифовальным кругом, следующие: а) требуемая стойкость инструмента T; б) предельная температура на режущих зернах $\theta^*_з$; в) прочность круга. Математическое описание ограничений по стойкости инструмента (ТК1)

$$T^* \leqslant T\,(v;\ v_1;\ t\ldots); \tag{2.46}$$

по предельной температуре на режущих зернах (ТК2)

$$\theta^*_з \geqslant \theta_з\,(v;\ v_1;\ t\ldots); \tag{2.47}$$

по прочности круга (ТК3)

$$v^* \geqslant v, \tag{2.48}$$

где v^* предельная скорость вращения, допускаемая прочностью круга.

Комплекс технических ограничений (2.38)—(2.48) описывает область возможных режимов шлифования. Если оптимизации подвергается комплекс из двух элементов режима резания, а другие элементы режима заданы, то упомянутая область представляет собою плоскую фигуру, очерченную соответствующими линиями. На рис. 2.39 в общем виде показана схема построения области возможных режимов резания в случае, когда отыскивается оптимальное сочетание скорости детали v_1 и глубины резания t (поперечной подачи s_2). Линиям на рис. 2.39 присвоены наименования ограничений ТИ1—ТК3, упоминавшиеся выше. Если оптимизируется комплекс из трех элементов режима работы, то каждое ограничение описывается не линией, а поверхностью того или иного вида, а область возможных режимов шлифования обращается в трехмерное пространство. При большем количестве элементов, характеризующих режим резания, область возможных режимов обращается в четырех или более мерное пространство.

Целевые функции представляют математическое описание цели, с которой производят оптимизацию режима шлифования. В зависимости от конкретных условий производства при оптимизации можно обеспечить наименьшую себестоимость обработки на данной операции, достижение на данной операции наибольшей производительности, минимальные затраты на шлифующий инструмент. Мо-

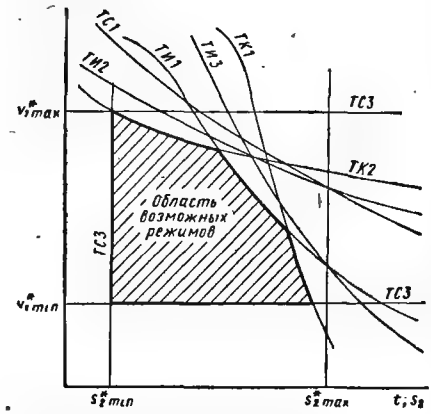


Рис. 2.39. Принципиальная схема области возможных режимов

гут быть и другие конкретные цели оптимизации.

В большинстве случаев при определении оптимальных режимов резания целью оптимизации должно быть получение минимальной себестоимости операции. Исследованиями в работе [28] показано, что, как правило, вариант режимов резания, обеспечивающий наименьшее штучное время, вместе с тем является и наиболее экономичным вариантом. Имея в виду, что решение задачи при целевой функции, содержащей условие минимального времени, оказывается более простым, чем при целевой функции, содержащей условие наименьшей себестоимости, а результаты в обоих случаях достаточно близки, целесообразно за основу оптимизации режимов шлифования принять достижение наибольшей производительности процесса.

Наибольшей производительности при прочих равных условиях соответствует наибольший минутный съем обрабатываемого материала Q:

$$Q = \frac{v_1 s_1 t}{1000},$$

где v_1 — скорость детали, м/мин; s_1 — подача в направлении, перпендикулярном скорости шлифования (вдоль, от круга при шлифовании периферией инструмента), мм; t — глубина шлифования, мм. Геометрически величина Q не зависит от скорости шлифования v. Однако на практике вследствие износа круга и его отжатия в процессе резания зависимость минутного съема Q от элементов режима резания оказывается более сложной, и поэтому целевая функция может быть представлена в виде формулы

$$Q = C_Q t^{x_Q} v_1^{y_Q} v^{z_Q} s_1^{p_Q}. \qquad (2.49)$$

При отсутствии осевой подачи s_1 в формулу (2.49) подставляют ширину площадки контакта шлифуемой поверхности с кругом (ширину детали). Задача оптимизации состоит, следовательно, в том, чтобы получить

$$C_Q t^{x_Q} v_1^{y_Q} v^{z_Q} s_1^{p_Q} \to \max. \qquad (2.50)$$

Можно показать [28], что при нахождении оптимальных режимов методом линейного программирования постоянный коэффициент C_Q не оказывает влияния на решение задачи, поэтому вместо выражения (2.50) можно написать

$$t^{x_Q} v_1^{y_Q} v^{z_Q} s_1^{p_Q} \to \max. \qquad (2.51)$$

Таким образом, в области возможных режимов, описываемой техническими ограничениями и графически представленной (для двух переменных) на рис. 2.39, следует отыскать точку, для которой справедливо выражение (2.51); она и будет соответствовать оптимальному режиму шлифования.

Выражения (2.38)—(2.48) вместе с целевой функцией (2.50) или (2.51) представляют математическую модель оптимального режима шлифования. Для решения этой системы в отношении интересующих нас элементов режима применяют электронную вычислительную машину. Предварительно целесообразно привести все упомянутые выше выражения к линейному виду, так как в этом случае задача

решается сравнительно просто средствами линейного программирования. Приведение к линейному виду осуществляют логарифмированием выражений (2.38)—(2.51), в связи с чем последние должны быть представлены как те или иные произведения переменных величин или степенные зависимости.

Расчет режимов резания резко упрощается с уменьшением количества переменных, подлежащих оптимизации. В связи с этим в ряде случаев, имея в виду, что подавляющее большинство используемых в производстве моделей шлифовальных станков не имеет устройств для регулирования частоты вращения шпинделя круга, расчет скорости шлифования не следует производить, а необходимо принимать значения v на основании практических рекомендаций. При расчете режимов резания следует лишь установить в соответствии с табл. 2.89 и 2.90 диапазон рекомендуемых значений v и, комбинируя частоту вращения шпинделя с диаметром круга, обеспечить попадание скорости вращения круга в этот диапазон.

Назначение режимов резания при шлифовании

Для выбора припусков на обработку и назначения режимов шлифования в тех случаях, когда их не рассчитывают, можно пользоваться данными, приведенными в табл. 2.89—2.99. Более подробные сведения можно получить в литературе [42, 64, 79, 97].

Выбор характеристики кругов, соответствующих рекомендуемым режимам, приведен в § 2.2 и 2.3.

Режимы абразивного и алмазного шлифования жаропрочных и труднообрабатываемых материалов

При шлифовании жаропрочных и титановых сплавов в зоне контакта круга с деталью возникают температуры, достигающие 1000—1300° С. Такие высокие температуры обусловлены сравнительно большими силами резания и низкой теплопроводностью указанных материалов. Увеличение сил резания при обработке жаропрочных материалов объясняется их свойством не только сохранять прочность при высоких температурах, но даже проявлять тенденцию к некоторому повышению механических характеристик в процессе деформирования материала при резании.

Износ шлифовального круга при обработке жаропрочных материалов протекает чаще всего следующим образом [113]. Сначала истираются вершины зерен, затем частицы стружки налипают на образовавшиеся площадки. Налипшие частицы создают в дальнейшем повышенное трение, что приводит к образованию вибрационных следов. Низкочастотные вибрации сопровождаются характерным звуком, свидетельствующим о затуплении круга.

Правильный выбор шлифовального круга является одним из важнейших условий, обеспечивающих высокое качество и заданную производительность процесса. Для обработки жаропрочных и высокопрочных сталей и сплавов следует применять круги из белого электрокорунда и монокорунда на керамической и вулканитовой связках, а также из эльбора и синтетических алмазов на керамической и бакелитовой связках. Титановые сплавы целесообразно шлифовать кругами из карбида кремния зеленого, эльбора и синтетических алмазов.

Характеристики шлифовальных кругов, рекомендуемых для обработки жаропрочных и титановых сплавов, жаропрочных и высокопрочных сталей, приведены в табл. 2.100 [65].

При шлифовании высокопрочных сталей, жаропрочных и титановых сплавов большое влияние на производительность процесса, износ круга и качество обработанной поверхности оказывают режимы резания.

В табл. 2.101 приведены режимы шлифования высокопрочных и жаропрочных сталей, а также жаропрочных и титановых сплавов [49, 65, 80]. При обработке жаропрочных сталей и сплавов большое влияние на интенсивность износа круга, производительность процесса и качество обработанной поверхности оказывают смазочно-охлаждающие жидкости.

Рекомендуемые диапазоны окружной скорости абразивных кругов

Таблица 2.89

Обрабатываемый материал	Операция шлифования	Шлифуемый материал	Связка круга	v, м/с
Автоматные стали (АС35Г2, АС12ХН, АС12Г2 и др.)	Круглое бесцентровое	Электрокорунд белый, хромистый	Керамическая	32—45
Цементуемые стали (19ХГНМ, 20ХГНМ, 30ХН и др.)	Круглое наружное	Электрокорунд белый, монокорунд	Керамическая	32—50
	Внутреннее	То же	Керамическая	25—35
Конструкционные стали (40ХГНМ, сталь 45, 38ХА и др.)	Круглое бесцентровое	Электрокорунд белый, хромистый, титанистый, монокорунд	Керамическая	27—45
Быстрорежущие стали	Круглое, плоское, фасонное	То же	Керамическая	26—35
	Внутреннее	То же	Керамическая	15—20
Высокопрочный и ковкий чугун (СЧ 25-05-03, СЧ 65-48-01 и др.)	Круглое, фасонное	Смесь электрокорунда белого с нормальным; электрокорунд титанистый	Керамическая	30—50
	Внутреннее	То же	Керамическая	20—25
	Обдирочное	Электрокорунд нормальный, циркониевый	Бакелитовая	30—45
Жаропрочные и титановые сплавы (Ж6, ВТ-5 и др.)	Фасонное	Электрокорунд белый, хромистый	Керамическая	35—50
	Обдирочное	Корунд кремния черный	Бакелитовая	25—40

Таблица 2.90

Рекомендуемые диапазоны окружной скорости алмазных кругов и кругов из эльбора при шлифовании различных материалов

Обрабатываемый материал	Операция шлифования	Шлифуемый материал	Связка круга	v, м/с
Твердые сплавы	Круглое наружное	Алмаз	Металлическая	25—35
			Органическая	25—30
	Внутреннее	»	Металлическая	15—20
			Органическая	20—25
	Плоское периферией круга	»	Металлическая	25—35
			Органическая	25—30
	Плоское торцом круга	»	Металлическая	20—25
			Органическая	25—30
			Керамическая	20—30
	Заточка режущих инструментов	»	Металлическая	15—20
			Органическая	20—25
			Керамическая	18—20
	Шлифование резьбы	»	Металлическая	30—40
	Профильное	»	Органическая	20—25
Легированные стали	Круглое	Эльбор	Органическая	30—50
	Плоское	»	»	30—40
	Заточка режущих инструментов	»	»	30—40
	Шлифование резьбы	»	Металлическая	40—45
Неметаллические материалы: микролит, стеклопластик	Круглое и плоское	Алмаз	Металлическая	30—35
			Органическая	
пьезокерамика			Металлическая	30—40

Таблица 2.91

Припуски (мм) на круглое и наружное шлифование абразивными кругами [42, 64]

Диаметр вала d, мм	Общий припуск при длине вала (мм) до						На финишное шлифование при длине вала (мм) до					
	100	250	500	800	1200	2000	100	250	500	800	1200	2000
30	0,3	0,4	0,4	0,5	0,6	—	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	—
50	0,4	0,4	0,5	0,6	0,7	0,7	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08
80	0,4	0,5	0,5	0,6	0,8	0,9	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08
120	0,5	0,5	0,6	0,8	0,8	0,9	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10
180	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,10
260	0,6	0,7	0,7	0,8	0,9	1,1	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,12
360	0,7	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	—	—	0,07	0,08	0,10	0,12
500	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	1,2	—	—	—	0,08	0,10	0,14

Примечание. При обработке многоступенчатых валов припуск принимается на каждую ступень отдельно, исходя из диаметра ступени d и общей длины вала.

Таблица 2.92

Припуски (мм) на шлифование отверстий

Диаметр отверстия d, мм	Общий припуск при длине отверстия (мм) до					На финишное шлифование при длине отверстия (мм) до				
	50	100	200	300	500	50	100	200	300	500
10	0,2	—	—	—	—	0,04	—	—	—	—
18	0,3	0,4	—	—	—	0,05	0,06	—	—	—
30	0,8	0,4	0,4	—	—	0,05	0,06	0,06	—	—
50	0,4	0,4	0,4	0,5	—	0,06	0,06	0,06	0,08	—
80	0,4	0,4	0,5	0,5	—	0,06	0,06	0,08	0,08	—
120	0,5	0,5	0,6	0,6	0,7	0,08	0,08	0,10	0,10	0,12
180	0,6	0,6	0,6	0,6	0,7	0,10	0,10	0,10	0,10	0,12
260	0,7	0,7	0,7	0,7	0,8	0,12	0,12	0,12	0,12	0,14
360	0,7	0,8	0,8	0,8	0,9	0,12	0,14	0,14	0,14	0,16
500	0,8	0,8	0,8	0,9	0,9	0,14	0,14	0,14	0,16	0,18

Таблица 2.93

Припуск (мм) на шлифование поверхности (припуск на сторону)

Длина обрабатываемой поверхности, мм	Общий припуск при ширине поверхности, мм			На финишное шлифование при ширине поверхности, мм		
	100	300	300—1000	100	300	300—1000
300	0,20	0,25	—	0,02	0,03	—
1000	0,25	0,30	0,40	0,03	0,04	0,05
1000—2000	0,30	0,40	0,40	0,04	0,05	0,06

Таблица 2.94

Припуск (мм) на бесцентровое шлифование (припуск на диаметр)

Материал обрабатываемой детали	Диаметр детали, мм					
	<20	21—50	50—100	101—150	151—200	201—250
Незакаленная сталь и чугун	0,2—0,3	0,3—0,4	0,4—0,5	0,45—0,55	0,5—0,6	0,6—0,7
Закаленная сталь	0,25—0,35	0,35—0,45	0,45—0,55	0,5—0,6	0,55—0,65	0,7—0,8

Таблица 2.95

Припуски на окончательное алмазное шлифование твердосплавных деталей, изготовленных методом прессования пластифицированных заготовок

Предварительная обработка	Максимальный припуск (мм) при требуемой шероховатости поверхности Ra, мкм	
	0,32	0,16
Электроискровая	0,15	0,17
Шлифование абразивными кругами КЗ	0,10	0,12
Алмазное шлифование кругами на металлической связке	0,05	0,08

Таблица 2.96

Режимы резания, применяемые при шлифовании конструкционных и инструментальных сталей абразивными кругами

Операция шлифования	v_1, м/мин	t, мм	s_1, мм
Круглое наружное с продольной подачей:			
предварительное	12—25	0,010—0,025	(0,3—0,7) H
окончательное	15—55	0,005—0,015	(0,2—0,4) H
Круглое врезание:			
предварительное	30—50	—	—
окончательное	20—40	—	—
Внутреннее на станках общего назначения:			
предварительное	20—40	0,005—0,02	(0,4—0,7) H
окончательное	20—40	0,0025—0,01	(0,25—0,4) H
Внутреннее на полуавтоматических станках:			
предварительное	50—150	0,0025—0,005	(0,4—0,75) H
окончательное	50—150	0,0015—0,0025	(0,25—0,4) H
Бесцентровое на проход:			
предварительное:			
при $d \leqslant 20$ мм	20—120	0,02—0,05	500—3800 м/мин
при $d > 20$ мм	20—120	0,05—0,20	500—3800 м/мин
окончательное	40—120	0,0025—0,010	1200—2000 м/мин
Бесцентровое врезанием:			
предварительное	10—45	—	—
окончательное	10—30	—	—
Плоское периферией круга на станках с круглым столом:			
предварительное	20—60	0,005—0,015	(0,3—0,6) H
окончательное	40—60	0,005—0,010	(0,2—0,25) H
Плоское периферией круга на станках с прямоугольным столом в основном производстве:			
предварительное	8—30	0,015—0,040	(0,4—0,7) H
окончательное	15—20	0,005—0,015	(0,2—0,3) H
Плоское периферией круга на станках с прямоугольным столом в инструментальном производстве:			
предварительное	3—8	0,05—0,15	1,0—2,0 мм/ход
окончательное	3—8	0,01—0,015	1,0—1,5 мм/ход
Плоское торцом круга на станках с прямоугольным столом:			
предварительное	4—12	0,015—0,04	—
окончательное	2—3	0,005—0,01	—

Примечания: 1. H — высота круга, мм.

2. Подача $s_в$ при бесцентровом предварительном и окончательном врезании равна 0,001—0,05 мм/об.детали, при круглом предварительном врезании 0,0025—0,075 мм/об.детали, при круглом окончательном врезании 0,001—0,005 мм/об.детали.

Таблица 2.97

Режимы резания, применяемые при обработке твердых сплавов алмазными кругами

Операция шлифования	Связка круга	v_1, м/мин	t, мм	s_1, мм/мин
Круглое наружное:				
предварительное	Металлическая	30—40	0,02—0,05	1000—1500
окончательное	Органическая	20—40	0,0025—0,005	500—1500
Внутреннее	Металлическая и органическая	10—30	0,0025—0,005	1000—1500
Плоское периферией круга	Металлическая	5—15	0,03—0,05	—
	Органическая	5—10	0,01—0,02	—
Плоское торцом круга	Металлическая и органическая	1—3	0,005—0,05	—
Заточка	Металлическая	1—3	0,03—0,08	—
	Органическая	1—3	0,02—0,05	—
Доводка	Органическая	0,5—1,5	0,005—0,02	—
Резьбошлифование	Металлическая	0,2—2,0	0,1—0,5 (черновая) 0,01—0,05 (чистовая)	—
Профильное	Органическая	1,5—2,0	0,01—0,02	—

Примечание. Подача s_2 при плоском шлифовании периферией круга для металлической связки равна 1—2 мм/ход, а для органической связки 0,5—1,5 мм/ход

Таблица 2.98

Режимы резания при обработке сталей и чугуна кругами из эльбора на органической связке [73]

Операция шлифования	v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	s_1, мм/мин
Круглое наружное	30—50	10—20	0,002—0,01	500—1000
Круглое наружное доводочное	30—50	8—10	0,002—0,005	500—1000
Плоское периферией круга	30—40	—	0,005—0,02	3000—5000
Заточка режущего инструмента	20—30	—	0,01—0,03	500—1500

Примечание. Подача s_2 при плоском шлифовании периферией круга равна 0,3—0,6 мм/ход.

Таблица 2.99

Режимы резания при обработке сталей кругами из эльбора на керамической связке [73]

Операция шлифования	v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	s_1, мм/мин	s_2, мм/ход
Круглое наружное	30—35	10—25	0,01—0,05	500—1 000	—
Круглое внутреннее	8—35	8—30	0,002—0,005	300—1 000	—
Плоское периферией круга	30—35	—	0,04—0,1	8 000—10 000	0,3—0,6
Резьбошлифование	30—45	0,2—1,2	0,05—0,5	—	—
Эвольвентного профиля зуба долбяков и шеверов	25—35	0,5—0,8	0,03—0,05	600 круговая подача	
Эвольвентного профиля круглых протяжек	28—35	—	0,01—0,03	1 500—2 000	—
Шлицешлифование	25—30	—	0,01—0,06	2 000—2 500	—
Зубошлифование	25—30	300 качаний в минуту	0,005—0,02	600	—
Профиля зубьев червячно-модульных фрез	25—30	0,2—0,4	—	—	0,03—0,05
Профиля ходовых винтов	30—35	0,4—0,8	—	—	0,05—0,01

Таблица 2.100

Рекомендуемые характеристики шлифовальных кругов для обработки жаропрочных сталей, жаропрочных и титановых сплавов

Материал обрабатываемой детали	Абразивный материал	Зернистость	Связка	Твердость	Структура	Концентрация, %
Стали:						
высокопрочные	24А	25—40	К	СМ1—С1	6—8	—
жаропрочные	ЛО	12—16	Б1	—	—	100
Жаропрочные сплавы	24А, 45А	16—40	К	М3—СМ2	6—9	—
	63С	16—25	К	СМ1—СМ2	6—8	—
Титановые сплавы	ЛО	125/100—160/125	Б1	—	—	100
	АСР		К5	—	—	
	АСВ		Б1	—	—	

Примечание. Характеристики круга для высокопрочной и жаропрочной стали даны для чистовой обработки.

Таблица 2.101

Режимы шлифования высокопрочных и жаропрочных сталей, жаропрочных и титановых сплавов

Материал обрабатываемой детали	Шероховатость *Ra*, мкм	Шлифовальный круг	Скорость круга, м/с			Скорость изделия, м/мин		
			при шлифовании					
			круглом	внутреннем	плоском	круглом	внутреннем	плоском
Стали:								
высокопрочные	0,63—2,5	Абразивный	25—35	20—30	25—35	30—60	30—50	10—20
жаропрочные	0,32—1,25	Эльборовый	25—35	25—35	—	10—50	30—50	—
Сплавы:								
жаропрочные	0,63—1,25	Абразивный	35—50	35—50	35—40	30—50	40—60	8—15
титановые	1,25—2,5	Абразивный	20—30	15—20	30—35	12—18	10—15	10—15
	0,63—2,5	Эльборовый	30—40	15—25	30—40	10—25	10—15	10—15
	0,63—2,5	Алмазный	20—30	10—20	—	10—20	10—15	—

Материал обрабатываемой детали	Продольная подача, мм/дв. ход			Глубина резания, мм		
				при шлифовании		
	круглом	внутреннем	плоском	круглом	внутреннем	плоском
Стали:						
высокопрочные	1—2	1—2	0,3—2,0	0,01—0,02	0,010—0,015	0,01—0.03
жаропрочные	0,5—1,0	0,5—1,5	—	0,005—0,01	0,005—0,010	—
Сплавы:						
жаропрочные	0,5—2,0	0,5—2,0	0,5—2,0	0,01—0,02	0,005—0,020	0,01—0,02
	1—4	1—5	1,0—1,5	0,01—0,03	0,01—0,02	0,01—0,03
	0,5—1,0	0,5—2,0	2—3	0,005—0,010	0,005—0,015	0,005—0,015
титановые	0,5—1,0	0,5—1,0	—	0,005—0,010	0,005—0,010	—

Эффективной смазочно-охлаждающей жидкостью при обработке жаропрочных сплавов является сульфофрезол с 10%-ной добавкой дизельного топлива. Применение водных растворов при шлифовании жаропрочных сплавов снижает минутный съем металла по сравнению со шлифованием всухую, но одновременно уменьшает износ круга, что в конечном результате приводит к увеличению удельной производительности при шлифовании.

При обработке титановых сплавов в качестве СОЖ следует применять 3—5%-ный водный раствор фосфорнокислого трехзамещенного калия с поверхностно-активными добавками 0,5% гексамета фосфата натрия ГМФ и 0,3% кальцинированной соды или водные растворы, содержащие 2% соды и 0,8% кальцинированной соды; 0,25% эмульсола, 0,5% тринатрийфосфата и 0,25% нитрита натрия; 0,3% *тринатрийфосфата*, 0,4% *триэтаноламина*, 0,3% *кальцинированной соды* и 0,5% буры.

§ 2.11. Скоростное, силовое и глубинное шлифование

К современным высокопроизводительным методам абразивной обработки относятся скоростное, силовое и глубинное шлифование, а также различные варианты сочетаний этих весьма перспективных технологических процессов абразивной обработки деталей.

Скоростное шлифование является наиболее известным высокопроизводительным методом абразивной обработки. С увеличением скорости вращения шлифовального круга уменьшаются сечение среза и силы резания, приходящиеся на режущую кромку зерна, снижаются высота микронеровностей на обработанной поверхности и расход абразива, повышается стойкость шлифовального круга. Все это позволяет увеличивать минутную подачу при сохранении требований к качеству обработки и при некотором снижении удельных энергетических затрат процесса шлифования. Увеличение минутной подачи приводит к пропорциональному уменьшению основного времени операции, что обеспечивает повышение производительности обработки. Установлено, что при повышении скорости круга с 35 м/с до 80 м/с машинное время шлифования снижается в 2—3 раза.

К скоростному шлифованию относят шлифование деталей со скоростями круга, превышающими 35 м/с, и при удельном съеме материала до 5 мм³/с·мм. В связи с этим скоростное продукционное шлифование целесообразно применять

при обработке деталей с обычными величинами припусков для повышения производительности процесса или качества обработки, а также при условии, что машинное время составляет 50—60% и более от времени цикла. В настоящее время известны исследования, в которых скорости шлифовального круга доведены уже до 300 м/с.

В табл. 2.102 приведены рекомендуемые режимы скоростного шлифования деталей, изготовленных из различных материалов [1].

Силовое шлифование со значительными съемами обрабатываемого материала находит все более широкое применение в практике металлообработки. Высокую производительность силового шлифования, сравнимую с производительностью механической обработки деталей лезвийными режущими инструментами, достигают абразивной обработкой деталей на мощных (мощность привода главного движения до 100—250 кВт) и жестких специальных станках, позволяющих шлифовать большие поверхности с прижимом круга до 1000 кгс при обычных (35 м/с) и повышенных (80 м/с) скоростях круга. В последнем случае процесс обработки принято называть скоростным силовым шлифованием. Силовое и скоростное силовое шлифование находит применение при обработке заготовок (отливок, поковок, проката). Во многих случаях эти процессы оказываются с экономической точки зрения вполне конкурентноспособными с лезвийной обработкой.

Силовое шлифование производят периферией, имеющей гладкий или фасонный профиль, и торцом абразивного круга. В последнем случае чаще всего используют сегментные или прерывистые круги.

Небезынтересно отметить, что в США скоростное силовое шлифование называют абразивной механической обработкой (Abrasive machining), а в ФРГ находит применение термин «интегральное шлифование».

В *табл. 2.103* даны режимы силового шлифования чугуна.

Глубинное шлифование называют еще однопроходным. Этот процесс заключается в том, что весь припуск на обработку снимают за один проход круга. Глубинное шлифование происходит при скорости круга 30—40 м/с и находит применение при обычной или электролитической алмазной заточке твердосплавных режущих инструментов, а также при плоском шлифовании деталей на станках с вертикальным и горизонтальным расположением шпинделя.

Исследованиями установлено, что глубинное шлифование позволяет при заданном качестве обработки существенно повысить производительность и снизить трудоемкость и стоимость операции.

Шлифовальные станки, применяемые для высокопроизводительных методов шлифования. Для скоростного, силового и глубинного шлифования используют как специализированные, так и универсальные станки. Последние чаще всего подвергают той или иной модернизации.

Специализированные шлифовальные станки для скоростного и силового шлифования отличаются высокой жесткостью и виброустойчивостью, они снабжены прочными и надежными системами ограждения кругов, имеют в ряде случаев устройства для балансирования кругов (в том числе для автоматического) и для их принудительной правки, оснащены приборами активного контроля деталей, работают по автоматическому или полуавтоматическому циклу.

В табл. 2.104—2.105 приведены характеристики некоторых моделей специализированных шлифовальных станков отечественного и зарубежного производства, предназначенных для скоростного и силового шлифования. Для скоростного шлифования могут быть использованы универсальные шлифовальные станки, прошедшие соответствующую модернизацию. Известен опыт модернизации круглошлифовальных станков мод. 3А130 Тольяттинского политехнического института, 3А151 (ЭНИМС), плоскошлифовальных станком мод. 3171 Харьковского политехнического института, 3711 (ВНИИАШ) и других моделей шлифовальных станков. При модернизации универсальных станков предусматривают увеличение мощности привода главного движения с использованием скоростных поликлиновых ремней. Для обеспечения нормального теплового режима работы подшипников скольжения шпинделя применяют насосные установки для охлаждения и подачи масла с расходом 10—15 л/мин. В качестве охладителей-теплообменников находят применение установки на базе фреоновых холодильников, а также специальные системы радиаторного типа.

Рекомендуемые режимы скоростного шлифования при скорости круга 60 м/с *Таблица 2.102*

Станок	Типовые детали	Материал обрабатываемой детали	Скорость детали, м/мин	Подача, м/мин			Повышение производительности, %
				врезанием		продольная	
				черновая	чистовая		
Кругло- и торцешлифовальный	Валы, оси, втулки, диски, кольца, детали сложной формы	Сталь 45, 20Х, 30Х, 35Х, 38ХА, 40Х, 18ХГТ, 30ХГТ, 12ХН3А, 15ХГНТА, 25ХГМ, 20Х2НГА	110	0,6—3,0	0,15—0,40	—	15—30
Внутришлифовальный	Втулки, диски, кольца		60	0,5—1,2	0,06—0,16	0,18—0,75	10—75
Бесцентрово-шлифовальный	Пальцы, клапаны, кольца подшипников	Сталь 45, 12ХН3, ШХ15	65	—	—	2500	10—30

Режимы силового шлифования торцом круга чугуна *Таблица 2.103*

Ширина шлифования, мм	Глубина шлифования, мм	Осевая сила, кгс				Допустимая подача детали, мм/мин				Мощность шлифования, кВт			
		при скорости круга, м/с											
		30	40	50	60	30	40	50	60	30	40	50	60
20	5	72	67	90	90	3000	3000	5000	6000	38	36	46	45
	10	105	100	100	117	1500	1500	2500	3000	38	34	44	44
	15	152	138	138	150	1000	1000	1500	2000	38	35	43	46
40	5	166	155	190	190	1500	1500	2500	3000	38	36	46	45
	10	240	230	250	245	750	750	1250	1500	38	34	44	44
	15	345	315	315	315	500	500	750	1000	38	35	43	46
60	5	260	250	250	270	1000	1000	1750	1750	38	36	47	46
	10	380	370	380	390	500	500	1000	1000	38	36	52	51
	15	510	500	460	540	200	200	500	750	28	27	39	53
80	5	440	430	410	400	750	750	1750	1500	38	37	39	45
	10	590	580	560	550	500	500	750	750	41	40	44	44
	15	730	710	710	700	250	250	500	500	37	36	44	46
100	5	640	620	550	580	750	750	1000	1250	43	42	47	51
	10	880	860	860	810	500	500	750	750	48	47	54	53
	15	1100	1080	1080	1050	250	250	500	500	42	41	53	52

Таблица 2.104

Станки для скоростного и силового шлифования

Страна, фирма, модель	Наибольшая скорость круга, м/с	Наибольший снимаемый припуск, мм	Мощность привода круга, кВт	Наибольшие длина и диаметр детали (размеры стола), мм	Размеры шлифовального круга ($D \times H$), мм
Круглошлифовальные станки					
СССР, Харьковский станкозавод им. Косиора:					
3М162	60	5	19	230×1000	750×80
3М161ИЕ	60	5	17	280×700	750×100
3Т161ИЕ	60	6	19,5	280×700	750×80
3Т160И	60	2	13	280×250	750×50
ХШЧ-80	60	7	55	280×700	750×170
3М161Д	60	5	17	280×700	750×170
СССР:					
МАЗ, И151	60—80	15	50/34,4	200×500	600×150
ВЕ-32	60—80	2	14	140×500	500×50
ФРГ, Фортуна, AFCД630	45—60	5	37	350×630	600×200
Италия, Джустина, 187В	40	7	25	254×610	610×132
Франция, Клиши, 5236	60	—	55	450×1000	750×200
Япония, Тоеда, 0А16-75Н	60	—	45	300×750	600×50
Англия, Ньюолл	100	—	50	320×1000	1000×300
Швеция, Иогансон, 3Р/НД	60	—	55	500×1350	750×350
Италия, Фамир, RTFC 120/50	120	0,3	22	31×30	508×20
США, Браун	80	7,0	15	50×56	—
Бесцентрово-шлифовальные станки					
СССР, Витебский станкостроительный завод им. С. М. Кирова:					
3М184И	60	2	30	80×250	500×150
3М185И	60	2	40	160×320	600×250
3Ш184И	60	5	55	80×540	500×550
Япония, Ниппей, GLG21-11	50	—	15	100×195	600×200
ОС-20НС	60	—	22	50×200	510×305
Внутришлифовальные станки					
СССР, Саратовский станкостроительный завод, СШ-122	60	—	13	130×125	100×63
Италия, Фамир, RTFOC 80/40C	70	0,25	7,5	25	20
Италия, Новарезе, P10/150	60	0,25	7	30	25
Швейцария, Воунард, ASCE 3 3	60	0,3	4,5	46	35
Плоскошлифовальные станки					
СССР, Липецкий станкозавод:					
3Е722	70	—	11,5	320×1250	450
3Е740	60	—	14,5	Диаметр стола 400	400
США, Бланшард	20	—	75	То же, 1350	900
ФРГ, Наксон-Унион	35	—	60—75	» 1600	850
ФРГ, Шмальц, 650	24	—	75	» 800	750
Англия, Сноу 760	38	—	110	» 750	850

Резьбошлифовальные станки

Таблица 2.105

Страна, фирма, модель	Наибольшая скорость круга, м/с	Мощность привода круга, кВт	Диаметр обработки, мм		Шаг шлифуемой резьбы		Диаметр круга, мм
			наименьший	наибольший	Метрическая, мм	Дюймовая	
СССР, МЗКРС 5822М	60	5,5		150	От 0,25 до 24,0	От 3 до 28 ниток на 1 дюйм	400
Швейцария, Рейсхауер	50	4,4	2	250	До 8	—	360
Англия, Матрикс	50	6,0	—	—	» 3	—	460

С увеличением скорости шлифования повышается контактная температура, а также образуется плотный воздушный поток вокруг быстровращающегося круга, препятствующий проникновению СОЖ в зону обработки, поэтому при модернизации станков система подвода охлаждения должна обеспечивать подачу СОЖ под давлением 2—10 кгс/см^2 с расходом 6—10 л на 1 кВт мощности привода круга. Для разрушения воздушного потока, увлекаемого кругом, используют механические и гидравлические способы.

Увеличение интенсивности съема металла приводит к существенному увеличению количества образующегося шлама, и поэтому весьма важна тщательная очистка СОЖ с помощью гидроциклонов, магнитных сепараторов, фильтров-транспортеров и центрифуг.

Значительный расход СОЖ способствует увеличению разбрызгивания жидкости, поэтому скоростные станки необходимо оснащать устройствами для отсоса и очистки образующихся аэрозолей.

Для создания возможностей увеличения производительности скоростных станков необходимо при модернизации обеспечить повышение пределов регулирования скорости детали таким образом, чтобы соотношение скоростей круга и детали не превышало 60.

Особое внимание должно быть уделено реконструкции кожуха шлифовального круга. Необходимо увеличить зазор между верхней обечайкой кожуха и периферией круга до 200 мм, что уменьшит количество осколков, вылетающих из кожуха в защищенную зону. Кожух должен быть оснащен козырьком, автоматически закрывающимся при разрыве круга.

Шпиндель скоростного станка должен иметь устройство для автоматической балансировки круга при его вращении непосредственно на станке. Для снижения вспомогательного времени скоростные станки целесообразно оснащать приборами активного контроля деталей и средствами для определения момента касания круга с деталью и включения рабочей подачи.

Для силового шлифования используют чаще всего специализированные, весьма мощные плоскошлифовальные, центровые и бесцентровые кругло- и внутришлифовальные станки, имеющие жесткую конструкцию всех узлов.

Глубинное шлифование можно производить на универсальных заточных станках, которые должны быть модернизированы с целью увеличения (в 3—4 раза) мощности привода, обеспечения равномерной продольной подачи со скоростями 0,4—4,0 м/мин, повышения осевой жесткости механизма привода до 2 кгс/мкм и интенсификации охлаждения зоны обработки [37, 95]. Жесткость заточных станков должна быть повышена до уровня требований, предъявляемых к шлифовальным станкам класса точности В. При использовании для глубинного шлифования плоскошлифовальных станков не требуется особой их модернизации. Нет необходимости, например, увеличивать мощность привода шпинделя станка мод. 3Б724, так как шлифовальный круг с планшайбой (масса комплекта 40 кг), работая как маховик, приобретает запас кинетической энергии до 29 кВт. Поскольку двигатель привода имеет мощность 22 кВт, то в итоге суммарная мощность превышает 50 кВт и вполне достаточна для глубинного шлифования.

Процесс глубинного шлифования проходит наиболее благоприятно, когда удается существенно снизить силу трения между столом плоскошлифовального станка и станиной, что может быть достигнуто за счет использования аэростатических направляющих [107]. Имеется положительный опыт модернизации фрезерных станков мод. 6А12П, 6А463 для глубинного шлифования [62].

Абразивный инструмент, применяемый для высокопроизводительных методов шлифования. Для скоростного, силового и глубинного шлифования используют абразивные, алмазные и эльборовые круги.

Для скоростного шлифования применяют абразивные круги, прочность которых существенно выше прочности инструментов, предназначенных для шлифования деталей с обычными (до 35 м/с) скоростями круга. Повышение прочности кругов достигается как соответствующим изменением их характеристики, так и изменением геометрической формы.

Отечественная абразивная промышленность выпускает электрокорундовые круги на керамической связке диаметром от 35 мм до 700 мм для работы со скоростями до 60 м/с. Имеются круги, работающие со скоростями до 80 м/с. Весьма перспективными являются шлифовальные круги, изготовленные из циркониевого и титанистого электрокорундов, а также из сферокорунда. В табл. 2.106 даны характеристики кругов, применяемых при скоростном шлифовании.

Для силового шлифования абразивные заводы выпускают инструменты на органической связке, обеспечивающие снятие до 200 кг металла в час, работающие с окружными скоростями до 60 м/с и силой прижима до 1000 кгс. Для силового шлифования используются круги форм ПП, ПН, ПР, ПВ (реже ЧК) диаметром от 200 до 750 мм (круги форм ПН и ПР до 1340 мм). Характеристика кругов выбирается в зависимости от рода выполняемых работ: так, обдирка поковок и отливок производится кругами зернистостью 80—125 и твердостью СТ1—Т1.

Для глубинного шлифования применяют алмазные круги из зерен АСР и АСВ, зернистостью 80/63—125/100, с концентрацией 100%, на металлических связках МО13; МО4, М58, М5, МС6, МВ1, МН13, а также абразивные круги из электрокорунда на бакелитовой связке твердостью СМ1—СМ2.

Таблица 2.106

Круги для скоростного шлифования

Обрабатываемый материал	Вид шлифования	Скорость круга, м/с	Тип шлифовального круга	Характеристика шлифовального круга
Сталь:				
ШХ15 (*HRC* 61—64)	Круглое наружное, врезное	70	Абразивный	24А16—25СМ17К5
30ХГСА (*HRC* 35—42)	Круглое наружное	70	»	24А40С1—СМ27К5
18ХНВА (*HRC* 33—44)	То же	70	»	24А40С1—С27К5
45 (*HRC* 49—51)	»	60	»	24А40М37К5
12Х18Н10Т (*HRC* 65—75)	»	120	»	24А25СМ17К5
40ХГНМ (*HRC* 48—52)	»	90	»	24А25М2—СМ27К5
Р6М5 (*HRC* 63—65)	»	75,5	Эльборовый	ЛО16Л25 100%
Р12Ф4К10М3 (*HRC* 66—70)		75,5		ЛО16Л25 100%
20Х23Н18	Внутреннее	55	»	ЛО8КБ 100%
Чугун СЧ 75-50-03 (*HRC* 50—52)	Круглое наружное	90	Абразивный	24А25М2—СМ27К5
Чугун СЧ 75-50-03 (*HRC* 50—52)	Бесцентровое	60	»	24А16—40С17К5
Твердый сплав ВК20	Плоское	90	Алмазный	АРС125/100МВ1 100%

Таблица 2.107

Значения съема металла $Q_ф$ (мм³/мм·с) и коэффициентов относительной производительности k при скоростном шлифовании различных материалов

Скорость круга, м/с	Сталь 40ХГНМ (*HRC* 48—50)		Сталь ШХ15 (*HRC* 59—61)		Сталь Р6М5 (*HRC* 61—63)		Сталь Р10К10Ф3М4 (*HRC* 63—66)		Чугун СЧ 75-50-03 (*HRC* 50—52)	
	$Q_ф$	k	$Q_ф$	k	$Q_ф$	k	$Q_ф$	k	$Q_ф$	k
25	0,70	0,95	0,67	0,86	0,66	0,60	0,50	0,60	0,68	0,89
40	1,03	0,93	0,93	0,87	0,78	0,62	0,65	0,55	0,98	0,88
60	1,46	0,91	1,26	0,85	1,25	0,55	0,79	0,50	1,34	0,89
80	1,66	0,90	1,60	0,86	1,40	0,63	1,10	0,60	1,62	0,90
90	2,12	0,90	2,00	0,84	1,85	0,68	1,36	0,55	2,10	0,88

Силовое шлифование, применяющееся при обдирке заготовок и при обработке деталей, позволяет обеспечивать точность размеров в пределах 0,01—0,05 мм, неплоскостность не более 0,05 мм на всей длине детали, шероховатость $Ra = 0{,}63 \div 2{,}5$ мкм. Съем материала при силовом шлифовании стали достигает 2800 мм³/с, чугуна — 6500 мм³/с, и это не предел.

Следует отметить, что при силовом скоростном шлифовании (60 м/с и более) круги из циркониевого и титанистого электрокорунда имеют повышенную стойкость (в 6—10 раз) и удельную производительность (в 8—12 раз). Достаточно высокое качество (точность, шероховатость) обработки, исключающее в ряде случаев последующие чистовые операции, а также весьма значительные съемы материала в единицу времени и повышенная стойкость инструментов приводят к тому, что во многих случаях силовое скоростное шлифование по производительности и другим технико-экономическим показателям превышает в несколько раз такие технологические операции, как фрезерование и строгание.

Особенностями скоростного шлифования являются уменьшение сечения среза, приходящегося на режущую кромку, и времени контакта круга с деталью, повышение температур в зоне обработки и динамического и термического воздействия на зерна круга, возникновение плотного воздушного потока у периферии круга, препятствующего попаданию СОЖ в зону шлифования, повышение уровня вибрации системы, увеличению центробежных сил и связанных с ними напряжений в теле абразивного круга. Все эти особенности, действуя одновременно, оказывают различное влияние на физические и технологические показатели процесса шлифования.

В табл. 2.107 приведены значения съема металла $Q_ф$, приходящегося на 1 мм высоты круга, при круглом наружном шлифовании с продольной подачей (4 мм/об. дет) стали и чугуна кругом ПП 400×25×127 с характеристикой 24А25М27К5 при отношении скоростей круга и детали $\alpha = \frac{v}{v_I} = 60$ и значения коэффициента относительной производительности $k = \frac{Q_ф}{Q_р}$ ($Q_р$ — расчетный съем металла).

Из табл. 2.107 видно, что съем металла увеличивается при повышении скорости круга. Коэффициент k, характеризующий работоспособность круга, сравнительно мало зависит от свойств обрабатываемого материала. Значения коэффициента относительной производительности k при эльборовом (ЛО16Л25 100%) скоростном шлифовании быстрорежущих сталей приведены в табл. 2.108. Хотя значения коэффициента k, приведенные в табл. 2.107 и 2.108 (для стали Р6М5), нельзя сравнивать из-за различных условий проведения экспериментов, все же видно, что при эльборовом шлифовании они в 1,5—1,6 раза выше, чем при абразивной обработке.

Повышение производительности процесса шлифования при возрастании окружной скорости круга обусловлено тем, что при этом создается возможность

Таблица 2.108

Значения коэффициента относительной производительности k при эльборовом шлифовании

Материал обрабатываемой детали	Скорость круга, м/с				
	30	40	50	60	70
Р6М5 (*HRC* 63—65)	0,90	0,92	0,95	0,97	0,98
Р12Ф4К10М3 (*HRC* 66—70)	0,88	0,91	0,93	0,94	0,96

существенно увеличивать минутную подачу без ухудшения (а в ряде случаев и с улучшением) качества обработанных поверхностей. При скоростном силовом шлифовании, когда абразивный инструмент работает преимущественно в режиме самозатачивания, создаваемого за счет прижима круга к детали с большим давлением, также наблюдается повышение съема металла по мере увеличения скорости круга. На рис. 2.40 приведена зависимость фактического съема металла $Q_ф$ от давления P в контакте круг—деталь при изменении окружных скоростей от 30 до 70 м/с. Повышение скорости v приводит к увеличению съема металла в 1,8—2,0 раза.

При глубинной заточке твердосплавного инструмента интенсивность съема материала составляет 600—1500 мм³/мин, и по сравнению с обычной (многопроходной) заточкой производительность этого процесса возрастает в 2—4 раза, и трудоемкость во столько же раз снижается.

Весьма существенное влияние скорость шлифования оказывает на шероховатость обработанных поверхностей. Установлено [97], что при шлифовании закаленной стали 45 (рис. 2.41) увеличение скорости приводит к снижению высот микронеровностей при всех исследованных значениях съема металла. При шлифовании труднообрабатываемых сталей Р18 и 12Х18Н10Т влияние скорости v на шероховатость обработки отражено на рис. 2.42.

Применение эльборовых кругов для скоростного шлифования позволило получить следующие эмпирические зависимости: для стали Р6М5

$$Ra = \frac{3{,}40}{v^{0\ 605}}$$

и для стали Р12Ф4К10М3

$$Ra = \frac{6{,}645}{v^{0{,}816}}.$$

В табл. 2.109 приведены значения шероховатости Ra в зависимости от окружной скорости при круглом шлифовании закаленной стали 40ХГНМ (*HRC* 48—50) кругами различных характеристик. Значения Ra даны для случая шлифования с постоянным отношением скоростей круга и детали ($\alpha = 60$) и при постоянном значении скорости $v_1 = 25$ м/мин $\left(\text{отношение } \frac{v}{v_1} \text{ изменялось в пределах } 60—192\right)$.

При шлифовании с $\alpha = 60$, когда пропорционально повышению скорости

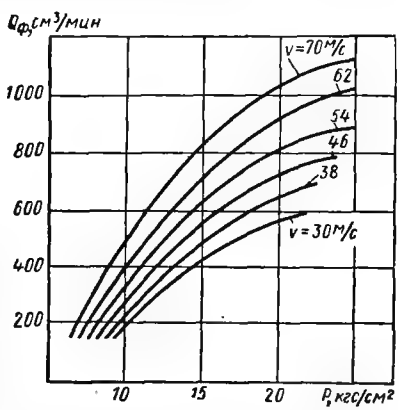


Рис. 2.40. Зависимость фактического съема металла $Q_ф$ от давления детали на круг при обработке ковкого чугуна КЧ35—10 с различными скоростями кругом 15А125СТ3Б

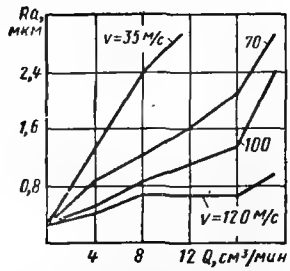


Рис. 2.41. Влияние скорости круга 24А25СМ17К5 на шероховатость обработанных поверхностей

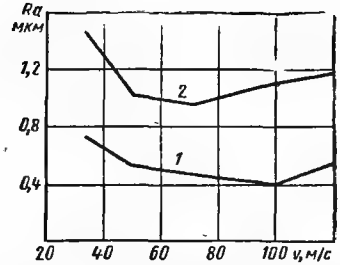


Рис. 2.42. Зависимость шероховатости поверхности от скорости круга 24А25СМ17К5:

1 — Р18; *2* — 12Х18Н10Т

круга повышается скорость съема материала, увеличение v практически не изменяет значения Ra; при шлифовании с $v_1 = 25$ м/мин, когда повышение скорости круга не изменяет съема материала, увеличение v приводит к существенному снижению высот микронеровностей.

При глубинной заточке твердосплавных инструментов шероховатость $Ra = 0{,}16 \div 0{,}63$ мкм (зернистость алмазных кругов 80/63—125/100).

При скоростном шлифовании повышается точность обработки деталей. Исследования, проведенные в ЭНИМСе, показали, что отшлифованные со скоростью круга 60 м/с детали имели погрешность формы (некруглость) в пределах 4—5 мкм. При скоростном эльборовом шлифовании быстрорежущих сталей [76] погрешность формы не выходила за пределы 2 мкм; при врезном шлифовании стали ШХ15 со скоростью до 77 м/с погрешность формы была в пределах 0,8—1,0 мкм, а волнистость обработанной поверхности 1 мкм; при бесцентровом шлифовании со скоростью 55 м/с [48] погрешность формы уменьшалась в 1,6—2,2 раза по сравнению с обработкой деталей со скоростью круга 22 м/с.

Важными технико-экономическими показателями процесса шлифования являются износ и стойкость абразивных кругов. Данные исследований свидетельствуют о том, что стойкость шлифовальных кругов возрастает с увеличением скорости их вращения. В ЭНИМСе получены следующие эмпирические формулы для расчета стойкости кругов T при круглом наружном и внутреннем шлифовании сталей со скоростью до 60 м/с:

$$T = \frac{180 v^{2,3} d}{v_1^{2,64} t^{1,81} H^{0,88}}; \qquad (2.52)$$

$$T = \frac{1{,}1 \cdot 10^{-6} v^2 d}{v_1^2 s^2 t^2}, \qquad (2.53)$$

где d — диаметр детали, мм; t — глубина шлифования, мкм/об; H — высота круга, мм; s — продольная подача в долях ширины круга на оборот детали.

Таблица 2.109

Влияние скорости шлифования на шероховатость обработанных поверхностей (Ra, мкм)

Скорость круга, м/с	24А25М27К5		24А25СМ17К5		24А25СМ27К5	
	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин
25	0,72	0,72	0,81	0,81	0,56	0,56
40	0,73	0,67	0,70	0,60	0,60	0,54
60	0,86	0,58	0,82	0,52	0,58	0,50
80	1,00	0,35	0,90	0,41	0,63	0,45

Таблица 2.110

Минутный объемный износ абразивных кругов (мм³/мин)

Скорость круга, м/с	24А25М27К5		24А25СМ17К5		24АСМ27К5	
	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин
25	37	37	32	32	28	28
40	63	27	57	30	46	22
60	79	26	77	28	60	21
80	83	24	82	25	82	19

Формула (2.52) получена для обработки стали 40Х (*HRC* 50—52) кругом ПП 600×50×305 24А25СМ27К5, а формула (2.53) для обработки кругом ПП 60×15×20 24А25СМ17К123. Из анализа формул (2.52) и (2.53) следует, что увеличение окружной скорости приводит к существенному повышению стойкости кругов. Стойкость круга возрастает в 4—6 раз при скоростном шлифовании (до 100 м/с) стали 45 (*HRC* 48—52) кругом ПП 400×32×203 24А25СМ17К5.

Износ круга во многом зависит от способа ведения скоростного шлифования (α = const или v_1 = const при изменении v). В табл. 2.110 приведены значения минутного объемного износа кругов разных характеристик при шлифовании стали 40ХГНМ (*HRC* 48—50), а в табл. 2.111 величины удельного расхода абразива.

При увеличении скорости круга с 25 до 80 м/с с $\alpha = 60$ минутный износ кругов возрастает, удельный расход остается практически неизменным, а съем металла увеличивается в 2,5—3,0 раза. Увеличение скорости v при постоянной скорости v_1 приводит к снижению минутного износа и удельного расхода абразива.

Скорость нарастания износа круга w в зависимости от скорости увеличения съема металла $Q_ф$ выражается формулой

$$w = C_w Q_ф^m.$$

Значения коэффициента C_w и показателя степени m при шлифовании стали 45 кругом 24А25СМ17К5 представлены в табл. 2.112.

Влияние скорости круга на его стойкость при различных режимах шлифования в ряде случаев рационально представлять в виде T — $Q_ф$ характеристик, позволяющих судить о работоспособности инструмента во всем диапазоне изменяющихся режимов резания. Такие характеристики показаны на рис. 2.43. При увеличении скорости v до 100 м/с наблюдается повышение значений T; дальнейшее увеличение v до 120 м/с приводит к снижению стойкости шлифовального круга, что объясняется ростом вибрации системы. Связь стойкости T с фактическим съемом металла $Q_ф$ описывается формулой

$$T = \frac{C_T}{Q_ф^x}. \qquad (2.54)$$

Таблица 2.111

Удельный расход абразивных кругов (мг/г)

Скорость круга, м/с	24А25М27К5		24А25СМ17К5		24АСМ27К5	
	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин	$\alpha = 60$	$v_1 = 25$ м/мин
25	0,056	0,056	0,048	0,048	0,035	0,035
40	0,053	0,036	0,050	0,038	0,038	0,031
60	0,053	0,037	0,045	0,036	0,035	0,030
80	0,046	0,035	0,038	0,032	0,035	0,028

Таблица 2.112

Значения коэффициента C_w и показателя степени

Скорость круга, м/с	Коэффициент C_w	Показатель степени m
35	0,10	1,8
70	0,04	1,5
100	0,06	1,5
120	0,10	1,7

Таблица 2.11

Значения коэффициента C_T и показателя степени x в формуле (2.54)

Скорость круга, м/с	Коэффициент C_T	Показатель степени x
35	79	2,15
70	140	1,75
100	150	1,60
120	57	1,80

Значения коэффициента C_T и показателя степени x при шлифовании стали 45 кругом 24А25СМ17К5 приведены в табл. 2.113.

С увеличением $Q_ф$ силы P_y и P_z возрастают (рис. 2.44). При этом темп нарастания значений P_y и P_z уменьшается по мере роста v. При шлифовании с постоянным съемом металла увеличение скорости круга с 35 до 120 м/с приводит к снижению силы P_z в 2—3 раза, а силы P_y в 1,5—2 раза.

При бесцентровом шлифовании стали 45 (*HRC* 38—42) увеличение скорости круга с 30 до 60 м/с привело к снижению сил резания на 60—70% [62].

Исследование сил резания при скоростном эльборовом шлифовании быстрорежущих сталей [76] позволило получить следующие эмпирические формулы (обработка кругом ЛПП 400×25×203×5 ЛО16Л25 100%):

для стали Р6М5 (*HRC* 63—65)

$$P_y = 93{,}8v^{-0{,}55}; \quad P_z = 32{,}1v^{-0{,}47};$$

для стали Р12Ф4К10М3 (*HRC* 66—70)

$$P_y = 114{,}2v^{-0{,}48}; \quad P_z = 25{,}7v^{-0{,}33}.$$

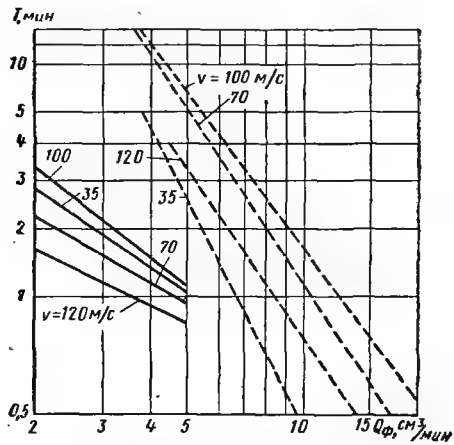


Рис. 2.43. Зависимость стойкости круга 24А25СМ17К5 от фактического съема металла при различных скоростях круга:

------ = сталь 45; ——— = сталь Р18

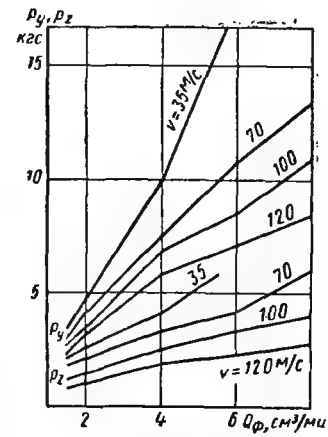


Рис. 2.44. Влияние скорости круга на силы P_z и P_y при различной скорости съема металла $Q_ф$. Обрабатываемый материал — сталь 45, круг 24А25СМ17К5

Таблица 2.114

Значения поправочных коэффициентов $K_м$

Шлифуемый материал	$\alpha=60$	$v_1=25$ м/мин
Сталь:		
40ХГНМ	1,00	1,00
ШХ15	1,08	1,15
Р6М5	1,10	1,20
Р10К10Ф3М4	1,16	1,25
Легированный чугун СЧ 75-50-03	1,02	1,10

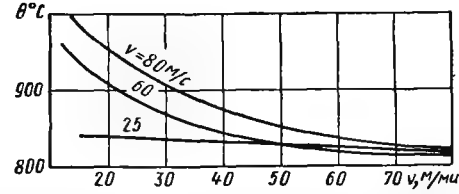


Рис. 2.45. Зависимость температуры шлифования θ от скорости детали при различной скорости круга 24А25М27К5

При глубинном шлифовании сталей периферией круга получены следующие эмпирические формулы для расчета сил резания P_z и P_y:

$$P_z = 8t^{0,3}s^{0,3}B^{0,6}; \quad P_y = 2,8t^{0,8}s^{0,6}B^{0,9},$$

где B — ширина шлифуемого образца.

Результаты расчета сил по приведенным формулам хорошо согласуются с экспериментами при $t > 0,2$ мм. Увеличение скорости круга приводит к повышению контактной температуры. Рост температуры способствует пластификации металла в зоне обработки, что облегчает его съем. Вместе с тем повышение температуры может привести к ухудшению качества поверхностного слоя детали. Установлено, что увеличение скоростей шлифования с 25 до 90 м/с (при $\alpha = 60$) приводит к повышению контактной температуры с 800° до 1070° С, с 930° до 1100° С, с 920° до 1140° С и с 980° до 1200° С при обработке соответственно закаленных сталей 40ХГНМ (*HRC* 48—50), ШХ15 (*HRC* 59—61), Р6М5 (*HRC* 62—63) и Р10К10Ф3М4 (*HRC* 64—66).

Значения контактных температур описываются следующими эмпирическими формулами:

при $\alpha = 60$

$$\theta = 500v^{0,16}K_м K_о;$$

при $v_1 = 25$ м/мин

$$\theta = 530v^{0,12}K_м K_о,$$

где $K_м$ — поправочный коэффициент, учитывающий марку шлифуемого материала (табл. 2.114); $K_о$ — коэффициент, учитывающий давление СОЖ, подаваемой в зону шлифования.

Поправочный коэффициент $K_о$ (для давлений СОЖ от 0,5 до 5 кгс/см²) может быть определен по формуле

$$K_о = 0,93p^{-0,08}.$$

Температуру при скоростном шлифовании с постоянным съемом материала можно снизить путем увеличения скорости вращения детали и давления СОЖ, изменения способа подачи СОЖ, применения более мягких абразивных кругов и некоторыми другими способами.

Влияние скорости детали на температуру при шлифовании закаленной стали 40ХГНМ (со съемом металла $Q_ф = 1,3$ мм³/мм·с) показано на рис. 2.45. Увеличение значения v_1 от 15 до 60 м/мин приводит к интенсивному снижению температуры; дальнейшее увеличение скорости v_1 сравнительно мало влияет на снижение θ. Влияние скорости детали на температуру уменьшается по мере снижения скорости круга, и при $v = 25$ м/с температура весьма мало зависит от скорости детали. Экспериментами установлено, что оптимальным является соотношение скоростей $\alpha = \frac{v}{v_1} = 50 \div 60$.

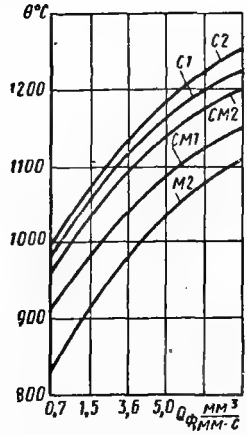


Рис. 2.46. Влияние характеристики круга на температуру шлифования

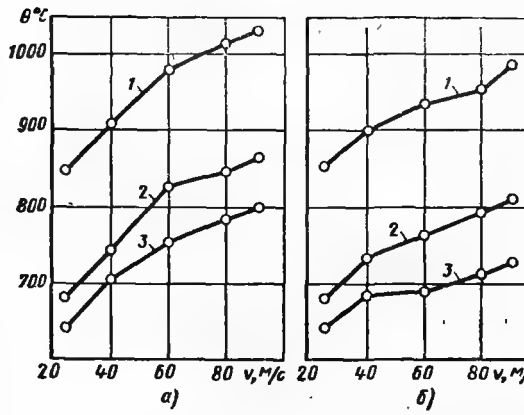


Рис. 2.47. Зависимость температуры θ от скорости круга v при шлифовании алмазными кругами:

1 — 24А25М27К5; *2* — АСВ200/160МО16; *3* — АСК200/160МО16; *а* — $\alpha = 60$; *б* — $v_1 = 25$ м/мин

Влияние твердости круга на температуру шлифования при обработке стали 40ХГНМ с $v = 80$ м/с кругами из электрокорунда 24А, зернистостью 25, на связке К5 приведено на рис. 2.46. Повышение температур замедляется при переходе от мягких (от М2 до СМ2) к более твердым (от СМ2 до С2) кругам.

Применение алмазных кругов при скоростном шлифовании легированного закаленного чугуна СЧ 75-50-03 (рис. 2.47) позволяет в 1,15—1,3 раза снизить контактную температуру по сравнению с абразивной обработкой При шлифовании с высокими скоростями круга весьма важное значение имеет обоснованный выбор состава и способа подачи СОЖ. Одним из путей повышения эффективности охлаждения является подача СОЖ под давлением. С увеличением значений p имеет место снижение температуры, при этом наиболее интенсивно температура снижается при увеличении давления до 3,5 кгс/см² (рис. 2.48). Дальнейшее увеличение p не дает ощутимого эффекта и приводит к сильному разбрызгиванию охлаждающей жидкости. Для разрушения воздушного потока эффективен гидравлический способ (ряд тонких струй, направленных по нормали к воздушному потоку), позволяющий снизить температуру шлифования на 8—10%.

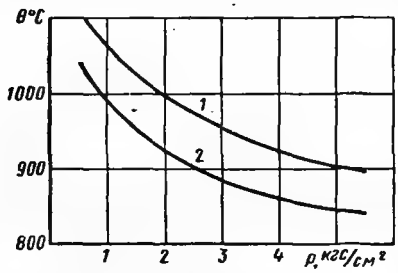


Рис. 2.48. Влияние давления p охлаждающей жидкости на температуру θ:

1 — сталь 40ХГНМ; *2* — сталь Р6М5 (абразивный круг 24А25М27К5)

При шлифовании деталей с высокими скоростями используют эмульсии, углеводородные среды и масла. Эмульсии применяют чаще всего в виде 5%-ных водных растворов и подают в зону шлифования с производительностью 15—30 л/мин при давлении 1—10 кгс/см². Хорошие результаты при скоростном шлифовании дает применение 10%-ного водного раствора эмульсола 45Э, а также масло Л (велосит). Рекомендуются к применению следующие составы СОЖ: 3%-ная эмульсия из эмульсолов Укринол-1, Укринол 1/1, Укринол-2 и Укри-

Таблица 2.115

Относительные технико-экономические показатели высокопроизводительных методов шлифования

Показатель	Скорость круга, м/с	
	40—50	60—80
Стойкость круга	1,3—1,6	2,0—3,0
Расход СОЖ	До 3	До 8
Высота микронеровностей обработанных поверхностей	0,6—0,8	0,4—0,5
Мощность привода главного движения	До 3	До 7
Минутный съем материала	» 2	» 5
Производительность по времени	» 4	» 8
Себестоимость:		
съема материала	0,5—0,7	0,2—0,4
операции	0,6—0,7	0,3—0,4

Примечание. При скорости $v = 25 \div 35$ м/с все показатели приняты за единицу.

нол-12; 5%-ная эмульсия из эмульсола Укринол-2; 7%-ная эмульсия из эмульсолов Укринол-12 и Империал-20; 10%-ная эмульсия из эмульсола Аквол-2.

Нормы расхода СОЖ (л/мин) при скоростном и силовом шлифовании могут быть определены исходя из зависимости $Q = (6 \div 10)\,N$, где N — мощность привода главного движения, кВт.

При глубинном шлифовании твердых сплавов обычно в качестве СОЖ применяют 3%-ный содовый раствор, подаваемый в зону обработки поливом с производительностью 8—12 л/мин.

Технологические особенности высокоэффективных методов шлифования являются основой того, что скоростное, силовое и глубинное шлифование, находящие все более широкое применение в машиностроении, обладают по сравнению с обычными методами шлифования весьма высокими технико-экономическими показателями. В табл. 2.115 представлены относительные обобщенные технико-экономические показатели скоростного и силового шлифования.

§ 2.12. Заточка и доводка режущего инструмента

Выбор формы шлифовального круга для заточки и доводки определяется конструкцией режущей части инструмента. Плоские поверхности затачивают торцовой поверхностью или периферией круга. При заточке задних поверхностей инструмента, когда круг не требуется вводит в стружечную канавку, используют круги чашечной формы или плоские с одно- или двусторонней выточкой. Передние поверхности многолезвийного инструмента с прямолинейным зубом затачивают торцовой поверхностью кругов тарельчатой формы. Для предупреждения подрезания передней поверхности зуба круги тарельчатой формы правят по дуге окружности и заточку производят тороидной поверхностью круга. Круг устанавливают под углом к оси инструмента на 2—3° больше угла наклона стружечной канавки. Стружколомающие канавки на инструментах из быстрорежущей стали (резцах, протяжках, сверлах) затачивают абразивными дисками; стружколомающие канавки на резцах, оснащенных пластинами из твердого сплава, затачивают фасонными кругами формы А5С или кругами двуглового профиля. Этими же кругами производят шлифование фасонных поверхностей на профилешлифовальных станках.

Круги прямого профиля применяют для проведения операций круглого шлифования для заточки передних поверхностей резцов, долбяков, ножей к сборным фрезам. Рекомендации по назначению областей применения абразивных и алмазных кругов приведены в табл. 2.116.

Таблица 2.116

Назначение шлифовальных кругов при заточке инструмента

Вид операции	Обозначение формы кругов	
	абразивных	алмазных
Заточка:		
резцов, задних поверхностей многолезвийных инструментов	ЧЦ, ЧК	АЧК, АПВ, АПВД
передних поверхностей многолезвийного инструмента с прямым зубом	ЗТ, ЧК	АТ, А1Т, А1ЧК
передних поверхностей инструмента с винтовым зубом	ЗТ	А3Т, А2ЧК
стружколомающих канавок на резцах, протяжках, подточка перемычки сверл	Д	А2П, А5П
Круглое шлифование рабочей части многолезвийных инструментов, заточка передних поверхностей долбяков, винтовая заточка сверл, затылование	ПП	АПП
Шлифование посадочных отверстий, заточка передних поверхностей и затылование плашек	ГЦ	А1ПП, АГЦ

Диаметр круга ограничивается возможностями оборудования и технологическими особенностями процесса заточки. При заточке долбяков и протяжек радиус кривизны рабочей поверхности должен быть меньше радиуса кривизны передней поверхности инструмента (рис. 2.49). Это условие обеспечивают, рассчитывая наружный диаметр круга и угол его установки по формуле

$$D = \frac{d \sin(\beta - \gamma)}{\sin \gamma},$$

где D — диаметр круга; d — максимальный диаметр затачиваемой поверхности инструмента; $\beta = \varphi + \gamma$ — угол, образованный осью шпинделя шлифовального круга с осью инструмента; φ — угол конической образующей шлифовального круга с плоскостью, перпендикулярной к его оси; γ — передний угол инструмента.

При затыловании инструментов диаметр круга ограничивается неподрезанием вершины следующего зуба. При заточке инструмента с винтовым зубом конической образующей кругов формы 3Т увеличение диаметра круга ограничивается появлением завала передней поверхности и образованием отрицательного переднего угла.

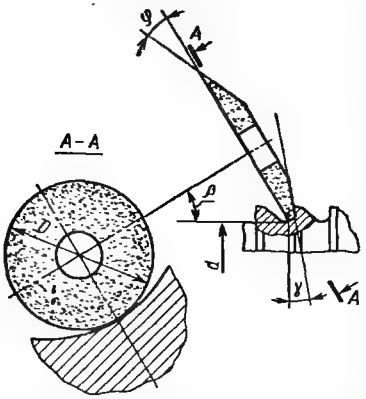


Рис. 2.49. Схема заточки передней поверхности круглой протяжки

Выбор шлифовальных кругов для обработки инструментов из быстрорежущих сталей. Инструмент из быстрорежущей стали затачивают кругами из электрокорунда, монокорунда и эльбора (табл. 2.117).

С уменьшением содержания вольфрама и молибдена в сталях нормальной производительности при одновременном увеличении содержания ванадия их шлифуемость кругами из электрокорунда и монокорунда ухудшается. Входящие в состав сталей повышенной производительности карбиды ванадия имеют тот же порядок твердости, что и электрокорунд. Поэтому шлифуемость этих сталей ниже шлифуемости сталей нормальной производительности и с увеличением содержания ванадия ухудшается.

Таблица 2.117

Выбор характеристики круга при заточке инструмента из быстрорежущей стали

Вид операции	Абразивный инструмент	Зернистость	Связка	Твердость
Заточка: резцов, задних поверхностей многолезвийного инструмента из стали нормальной производительности	Электрокорунд	25—16	Керамическая	М3—СМ1
резцов, задних поверхностей многолезвийного инструмента из стали повышенной производительности	Эльбор	Л100/80—Л50/40	Бакелитовая	—
	Монокорунд	25—16	Керамическая	М3—СМ1
передних поверхностей инструмента с прямолинейным зубом (разверток, метчиков, червячных фрез)	Эльбор	Л63/50—Л50/40	Бакелитовая Керамическая	—
	Монокорунд	25—16	Керамическая	СМ1—СМ2
передних поверхностей инструмента с винтовым зубом (концевых и насадных)	Монокорунд	16—12	Керамическая	СМ3—С1
	Электрокорунд	25—16	Керамическая	СМ3—С1
Доводка фасок и ленточек на рабочей части инструмента	Эльбор	Л63/50—Л50/40	Керамическая	—
	Зеленый карбид кремния	8—6	Бакелитовая	СМ2—С1
	Алмаз	АСВ А100/80—63/50	Органическая	—
Вышлифовывание стружечных канавок концевого инструмента	Электрокорунд	12—6	Вулканитовая В1	СТ1—СТ2
	Монокорунд	12—6	Бакелитовая Б3	СТ1—СТ2
Круглое шлифование инструмента	Электрокорунд	40—16	Керамическая	С1—С2

Круги из эльбора практически одинаково хорошо обрабатывают все группы быстрорежущих сталей, так как твердость эльбора значительно выше твердости карбидов, входящих в состав этих сталей.

Зернистость абразивных кругов, применяемых при заточке и доводке инструмента из быстрорежущих сталей, находится в пределах от 40 до 6. Зернистость 40 применяют для черновых работ и обдирки на точильно-шлифовальных станках. Для заточных работ наиболее распространенной является зернистость 25—16. При профильном шлифовании, вышлифовывании стружечных канавок и в других случаях, когда требуется малый радиус скругления сопряженных поверхностей, применяют круги зернистостью 12—6.

Твердость абразивных кругов для заточки инструмента выбирают в пределах М3—С2. Стали повышенной производительности обрабатывают более мягкими кругами. Мягкие круги применяют также при больших площадях контакта, при работе без охлаждения или недостаточном охлаждении. При линейном контакте круга с инструментом (например, при заточке сверл, круглом шлифовании и т. д.) и интенсивном охлаждении заточку можно производить сравнительно твердыми кругами С1, С2. При заточке инструмента из быстрорежущей стали применяют круги на керамической, бакелитовой и вулканитовой связках. Наибольшее распространение находят керамические связки. Бакелитовые и вулканитовые связки применяют при изготовлении кругов, используемых при вышлифовывании стружечных канавок, а также для доводки инструмента. Круги на бакелитовой и вулканитовой связках применяют твердостью на одну-две степени выше, чем твердость кругов на керамической связке.

Режимы резания при заточке инструментов из быстрорежущих сталей. В табл. 2.118 приведены рекомендации по режимам резания при заточке инструментов.

Если применяются круги твердости более высокой, чем рекомендуемая, то скорость шлифования следует уменьшать, а при работе мягкими кругами увеличивать. Круги на бакелитовой и вулканитовой связках допускают увеличение скорости резания на 20—30% по сравнению с кругами на керамической связке.

Подача на глубину в наибольшей мере определяет производительность заточки. Максимальные значения подач на глубину рекомендуются при заточке

Таблица 2.118

Рекомендуемые режимы резания при заточке инструментов из быстрорежущих сталей (продольная подача равна 2—3 мм/дв. ход)

Вид операции	Скорость резания, м/с	Скорость детали, м/мин	Подача на глубину, мм/дв. ход
Круглое шлифование рабочей части инструмента	25—30	15—20	0,02—0,04
Заточка:			
резцов и задних поверхностей многолезвийных инструментов кругами из электрокорунда и монокорунда	20—25	2—3	0,08—0,12
передних поверхностей многолезвийного инструмента кругами из			
эльбора	20—25	1—2	0,01—0,02
монокорунда	—	2—3	0,03—0,05
передних поверхностей инструмента с винтовым зубом кругами из электрокорунда и монокорунда	20—25	2—3	0,02—0,04
Доводка фасок и ленточек кругами:			
из эльбора	20—25	0,5—1	0,01—0,02
из карбида кремния	20—25	1—2	0,005—0,01
алмазными	18—20	0,5—1	0,005—0,01
Вышлифовывание стружечных канавок на многолезвийных инструментах	35—60	0,5—1	—

открытых поверхностей инструмента в условиях, обеспечивающих достаточно высокую жесткость технологической системы. Существенное преимущество эльборовой обработки при заточке быстрорежущих инструментов по сравнению с алмазной состоит в почти полном отсутствии засаливания кругов из эльбора, слабом влиянии состава стали на показатели процесса заточки.

Выбор характеристики кругов при заточке твердосплавного инструмента. Заточку твердосплавного инструмента производят кругами из зеленого карбида кремния и алмазными кругами. Кругами КЗ выполняют операции предварительной заточки. Они позволяют обрабатывать одновременно твердосплавную пластину и прилегающий к ней участок стального корпуса инструмента. Алмазные круги применяют для заточки режущей части инструмента и доводки фасок. Обработку стального корпуса инструмента производят кругами из электрокорунда.

При заточке абразивными кругами назначают зернистость, связку, твердость, структуру круга согласно табл. 2.119. Для заточки резцов кругами КЗ формы ПП, ПВ, ЧЦ применяют круги зернистости 40—25. Для заточки многолезвийного инструмента кругами формы ЧК и тарельчатыми применяют круги зернистостью 25—16. С увеличением зернистости кругов из зеленого карбида кремния уменьшается их износ, снижается вероятность образования трещин на пластинах твердого сплава. Однако шероховатость заточенной поверхности увеличивается. Круги из зеленого карбида кремния применяют на керамической и бакелитовой связках. Круги на керамической связке распространены более широко. При работе кругами из зеленого карбида кремния на керамической связке необходимо тщательно выдерживать требования по ограничению его твердости и скорости резания. Круги на бакелитовой связке можно применять на одну-две степени большей твердости, чем круги на керамической связке. Ими можно работать при более высоких скоростях шлифования.

Твердость кругов из зеленого карбида кремния является важнейшим фактором, определяющим их работоспособность. Наиболее распространенный диапазон твердости кругов на керамической связке М2—СМ1, на бакелитовой М3—С1.

Для обработки твердых сплавов, склонных к образованию трещин, применяют мягкие круги. С увеличением прочности сплавов можно допускать круги более высоких степеней твердости. Круги повышенной твердости в некоторых случаях применяют при заточке многолезвийного инструмента для увеличения точности обработки. Однако в этом случае площадь контакта торцовой поверхности круга с инструментом следует уменьшать поднутрением круга.

Правильность назначения твердости круга может быть проверена по величине его удельного объемного износа. При механизированной заточке инструмента круг должен интенсивно самозатачиваться. Оптимальная величина удельного объемного износа 20—30 мм^3 круга на 1 мм^3 снимаемого твердого сплава. При такой величине износа круг практически не нуждается в правке. При ручной заточке на точильно-шлифовальных станках допускается уменьшение удельного износа круга до 5 мм^3/мм^3 за счет повышения твердости круга и скорости его вращения, при этом круг необходимо часто править.

При одних и тех же режимах заточки износ кругов КЗ возрастает с увеличением содержания карбидов титана и уменьшением содержания кобальта в пластинах твердого сплава. Для заточки твердосплавных инструментов кругами КЗ на керамической связке применяют структуру № 6—8, а на бакелитовой связке структуру № 4—5.

При выборе связки и зернистости кругов для заточки твердосплавных инструментов в зависимости от требуемой шероховатости следует иметь в виду рекомендации, приведенные в табл. 2.120.

Режимы резания при заточке инструментов кругами из карбида кремния приведены в табл. 2.119, а при заточке алмазными кругами — в табл. 2.121.

Упругая заточка режущего инструмента осуществляется введением в систему станок—приспособление—круг—деталь звена пониженной жесткости. При упругой заточке инструмента интенсивность съема обрабатываемого материала определяют по величине силы прижима круга к инструменту и режущей способности круга. Упругая заточка обеспечивает стабилизацию динамических и тепловых явлений, сопровождающих процесс резания. Поскольку эти факторы

Таблица 2.119

Назначение режимов резания и выбор шлифовальных кругов для заточки инструмента с пластинками из твердого сплава кругами из зеленого карбида кремния

Вид операции	Форма шлифовального круга	Обрабатываемый материал	Характеристика круга			Режимы шлифования			
			Зернистость	Связка	Твердость	Скорость резания м/с	Скорость детали, м/мин	Продольная подача, м/мин	Поперечная подача, мм/дв. ход
Круглое наружное шлифование рабочей части инструмента	ПП	Т30К4, ВК2, Т15К6, Т14К8 ВК6, ВК8, Т5К10	25—40	К	М3 СМ1 С1	12 15 20	25	3—5	0,02 0,03 0,05
Заточка резцов и открытых задних поверхностей рабочей части многолезвийного инструмента	ЧЦ, ЧК	Т30К4	25—40	К	М2	8	25	4—6	0,03—0,05
		ВК2, Т15К6, Т14К8		Ь К	М3 М4	10 12			0,08—0,10
		ВК6, ВК8, Т15К6		Б К Б	СМ1 СМ1 СМ2	15 15 18			
Заточка передних поверхностей многолезвийного инструмента	ЧК, ЗТ	Т30К4	16—25	К	М3—СМ1	10—12	4—6	4—6	0,02
		ВК2, Т15К6		Б	СМ1	15			0,03
		Т14К8		К Б	СМ2 СМ2	18 15			0,05
		ВК6, ВК8		К	С1	18			

Таблица 2.120

Назначение зернистости и связки алмазных кругов в зависимости от требований к шероховатости обработанной поверхности при заточке твердосплавного инструмента (концентрация 100%)

Вид обработки	Шероховатость *Ra*, мкм	Связка	Зернистость
Заточка твердосплавных пластин	0,32—0,63	Металлическая М5, МО13, МВ1, органическая Б1, Б156, ТО2	АСР, АСВ200/160—100/80
	0,16—0,32		АСО160/125—63/50
Заточка твердосплавных пластин совместно с державкой	0,63—1,25	Керамическая К1	АСР250/200—125/100
Заточка стружколомающих лунок и порожков, вышлифовка стружечных канавок мелкоразмерного инструмента	0,08—0,16	Металлическая М5, МВ1, М1	АСВМ60/40—М14/10
Доводка твердосплавных пластин	0,08—0,16	Органическая Б1, КБ	АС63/50—АСМ 60/40
Продольное шлифование	0,16—0,32	Органическая Б2, Б156, ТО2	АСО100/80—63/50

Таблица 2.121

Режимы резания при алмазной заточке твердосплавного инструмента

Вид операции	Связка круга	Скорость резания, м/с	Скорость детали, м/с	Продольная подача, м/мин	Подача на глубину, мм/дв. ход
Круглое наружное шлифование рабочей части инструмента:					
предварительное	Металлическая	20—25	30—40	1,0—1,5	0,02—0,05
окончательное	Органическая	25—30	20—40	0,5—1,5	0,0025—0,005
Заточка по твердосплавной пластине:					
Т30К4	Металлическая				0,01—0,02
Т15К6	МК, МИ, МВ1, М5, МО13, МК, МИ, МВ1, М5, МО13, МК, МИ, МВ1, М5, МО13				0,025—0,03
Т14К8					0,01—0,05
ВК2		16—22	1,5—2	—	0,06—0,08
ВК8, ВК6					0,05—0,07
Т5К10					0,08—0,1
Заточка стружколомающих лунок методом глубинного шлифования с поперечной подачей	Металлическая	15—20	1,5—2,0	—	0,03—0,05

Примечания: 1. При работе кругами на металлических и керамических связках применение охлаждающей жидкости обязательно.

2. Для охлаждения рекомендуется водный раствор состава 0,3% $NaNO_2$, 0,5% соды; расход СОЖ 3—5 л/мин.

оказывают наибольшее влияние на образование прижогов, трещин и других поверхностных дефектов, применение упругой заточки способствует стабилизации качества заточенной поверхности.

Упругая заточка нашла наибольшее распространение в технологических процессах изготовления резцов, оснащенных пластинами из твердого сплава. Механизмами, обеспечивающими упругую заточку, оснащены станки мод. 3А624, 3Д624, 3Е625, 3623, 3Е624Э. Станки мод. 3А624 и 3Д624 предназначены для абразивной заточки резцов, станок мод. 3Е624 для алмазной, а станок мод. 3623 и 3Е624Э для электрохимической алмазной заточки.

При упругой заточке инструмент в течение всего периода съема припуска не должен выходить из контакта со шлифовальным кругом. Для того чтобы нормальное давление оставалось постоянным, длину хода шлифовального круга следует принимать такой, чтобы изменение площади контакта было минимальным. Поскольку контакт круга с деталью при упругой заточке является непрерывным, для предупреждения нагрева детали в зону резания следует подводить охлаждающую жидкость.

Для выполнения упругой заточки следует применять круги на металлических или керамических связках. Доводку инструмента следует выполнять кругами на бронзовых связках, заточку с интенсивным съемом припуска — кругами на алюминиево-цинковых связках типа М5 или МВ1. В кругах на бронзовых связках при упругой заточке следует применять зерно АСВ, в кругах на алюминиево-цинковых, керамических связках — зерна АСО или АСП. В случае использования кругов на металлических связках для электрохимической заточки следует применять зерна АСВ.

При упругой заточке по мере увеличения продолжительности шлифования, вследствие затупления режущих зерен интенсивность съема обрабатываемого материала уменьшается. Изменение интенсивности съема Q в зависимости от количества сошлифованного твердого сплава W приближенно описывается уравнением

$$Q = Q_0 \frac{1}{1 + \mu W},$$

где Q_0 — начальная интенсивность съема; μ — коэффициент затупления, определяемый экспериментально.

Экономичность операций упругой заточки во многом определяется правильным выбором периода стойкости круга. Анализ затрат, связанных с выполнением упругой заточки, показывает, что объем материала, снимаемого за период стойкости, может быть определен из выражения

$$W = \sqrt{\frac{2C_{пр}Q_0}{\mu C_м}},$$

где $C_{пр}$ — затраты на правку шлифовального круга; $C_м$ — стоимость станко-минуты работы заточного станка.

Средняя интенсивность съема за период стойкости достигает максимума при скорости вращения круга 22—25 м/с. Этому же диапазону соответствует и минимальный расход алмазного круга.

Наибольшее влияние на показатели процесса упругой заточки оказывает выбор контактного давления. При упругой заточке следует применять максимальное контактное давление, обеспечивающее отсутствие сколов, трещин и прижогов. Процесс заточки следует заканчивать выхаживанием. Выбор величины контактного давления зависит от марки твердого сплава. Для сплава Т30К4 контактное давление составляет 5 кгс/мм²; для Т15К6, ВК2 8—10 кгс/мм²; для Т14К8, ВК4 10—12 кгс/мм²; для Т5К10, ВК6, ВК8 12—15 кгс/мм².

С увеличением в твердых сплавах содержания кобальта и уменьшением содержания титана их прочность увеличивается, а вероятность образования трещин уменьшается, поэтому допускаемое контактное давление с увеличением содержания кобальта увеличивается.

При упругой заточке следует применять широкие круги, так как это способствует увеличению допускаемой величины нормальной силы, определяющей интенсивность съема обрабатываемого материала.

Типовые технологические процессы заточки режущих инструментов. Основными видами операций, выполняемых при заточке режущего инструмента, являются предварительное и окончательное круглое шлифование рабочей части инструмента, заточка передних и задних поверхностей, доводка фасок и ленточек, заточка элементов, способствующих разделению, завиванию и дроблению стружки.

Заточку инструмента с напаянными пластинками из твердого сплава выполняют по следующим схемам.

Схема 1. Заточка стального корпуса кругами из электрокорунда; заточка твердосплавной пластины кругами из карбида кремния зеленого; доводка фасок и ленточек алмазными кругами.

Схема 2. Заточка кругами КЗ одновременно твердого сплава и стальной державки; доводка фасок и ленточек алмазными кругами.

Схема 3. Заточка одновременно твердого сплава и стальной державки алмазными кругами на металлических связках по методу электрохимического шлифования или алмазными кругами на керамических связках.

Схема 4. Алмазная заточка всей твердосплавной пластинки или фаски.

Схемы 1 и 2 применяют при больших припусках, а также в тех случаях, когда для удовлетворительной работы инструмента необходима тройная заточка.

Схему 3 применяют, когда припуск на заточку не превышает 0,3—0,4 мм, схему 4 применяют в тех случаях, когда конструкция инструмента обеспечивает вылет пластинки из корпуса и отсутствие контакта круга со сталью.

Типовые технологические процессы заточки некоторых видов режущих инструментов приведены в табл. 2.122—2.126.

Инструмент из быстрорежущей стали затачивают по следующим схемам обработки.

Схема 1. Заточка кругами из электрокорунда.

Схема 2. Заточка кругами из электрокорунда, доводка фасок и ленточек кругами из эльбора.

Схема 3. Заточка кругами из эльбора.

Обработку по схеме 1 применяют при необходимости получения шероховатости заточенной поверхности $Ra \geqslant 0{,}63$ мкм. Схемы 2 и 3 применяют, когда требуется обеспечить шероховатость $Ra < 0{,}32$ мкм; при этом схему 2 применяют, когда припуск на обработку превышает 0,2—0,3 мм, используя круги из эльбора на связках Б1 или КБ. Эти круги можно применять для заточки инструмента по схеме 3 при величине припуска менее 0,2—0,3 мм. Схему 3 можно применять и при большей величине припуска, но при этом следует использовать круги из эльбора на связках БИ-1 и С10, обеспечивающих интенсивность съема обрабатываемого материала не менее 300—500 мм^3/мин, а удельный расход эльбора не свыше 1—2 мг/г. Заточку кругами на связке С10 следует выполнять с охлаждением.

Операции круглого шлифования применяют в технологических процессах заточки в том случае, когда необходимо обеспечить точный размер инструмента по диаметру (например, развертки), оставляя цилиндрическую ленточку. При заточке инструмента без ленточки (торцовые фрезы) круглое шлифование применяют при работе на универсально-заточных станках, когда контроль за величиной съема с каждого зуба осуществляют визуально. При работе на автоматизированных станках (мод. 3Г667, 3Э667, 3672) необходимая точность обработки достигается без предварительных операций круглого шлифования.

Таблица 2.122

Типовой технологический процесс заточки и доводки прямого проходного резца, оснащенного пластинкой из твердого сплава с использованием наклонного стола (вариант абразивно-алмазной обработки)

Наименование операции	Эскиз обработки	Станок (модель)	Характеристика круга	Режим обработки			Охлаждение	Измерительный инструмент
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход		
Заточить главную заднюю поверхность		3Б632В	ЧЦ 250 63С40М3К	10—15	2—4	0,03—0,05	0,5% -ный водный раствор нитрита натрия; расход 3—4 л/мин	Угломер
Заточить вспомогательную заднюю поверхность		3Б632В	ЧЦ 250 63С40М3К	10—15	2—4	0,03—0,05	То же	Угломер
Довести фаску на главной задней поверхности		3622, 3622Д, 3Б632В	АСР63/50М1 (МК) 100% АЧК 150×20×32	25—30	0,7—1,0	—	0,5% -ный водный раствор нитрата натрия; расход 0,5—1 л/мин	Угломер, линейка масштабная

Продолжение табл. 2.122

Наименование операции	Эскиз обработки	Станок (модель)	Характеристика круга	Режим обработки			Охлаждение	Измерительный инструмент
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв.ход		
Довести фаску на вспомогательной задней поверхности		3622, 3622Д, 3Б632В	АЧК 150×20×32 АСР63/50М1 (МК) 100%	25—30	0,7—1,0	—	0,5% -ный водный раствор нитрата натрия; расход 0,5—1 л/мин	Угломер, линейка масштабная
Довести фаску на передней поверхности		3622Д		25—30	1,0—1,5	—	То же	То же
Довести радиус при вершине		3622Д		25—30	1,0—1,5	—	То же	Угломер, радиусный шаблон

Таблица 2.123

Типовой технологический процесс заточки и доводки прямого проходного резца с пластинкой из твердого сплава с использованием наклонного стола (вариант алмазной обработки)

Наименование операции	Эскиз обработки	Станок (модель)	Характеристика	Режим обработки		
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход
Заточить главную заднюю поверхность		3Е624	АЧК 150×20×32 АСР80/63 МВ1 или ТМ2 100%	20—25	1,5—2,0	0,03—0,05
Заточить вспомогательную заднюю поверхность		3Е624, 3622, 3Б632В		20—25	1,5—2,0	0,03—0,05
Довести переднюю поверхность по фаске		3626, 3622, 3622Д, 3Б632В	АЧК 150×20×32 АСР63/50 М1 (МК) 100%	25—30	0,7—1,0	Ручная

Продолжение табл. 2.123

Наименование операции	Эскиз обработки	Станок (модель)	Характеристика	Режим обработки		
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход
Довести главную заднюю поверхность и радиус при вершине		3622Д, 3Б632В	АЧК 150×20×32 АСР63/50 М1 (МК) 100%	25—30	—	Ручная

Примечания: 1. Технологический процесс обработки ведут с охлаждением.
2. Измерительными инструментами являются угломер и масштабная линейка.

Таблица 2.124

Типовой технологический процесс заточки токарных проходных резцов из быстрорежущих сталей на станке 3Б623В

Наименование операции	Эскиз обработки	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки			Измерительный инструмент
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	
Заточить переднюю поверхность		Для заточки передних поверхностей	ЧЦ 150×80×32 24А25СМ1К	20—25	2—3	0,03—0,05	Маятниковый угломер

Продолжение табл. 2.124

Наименование операции	Эскиз обработки	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки			Измерительный инструмент
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	
Заточить главную заднюю поверхность		Для заточки передних поверхностей	ЧЦ 150×80×32 24А25СМ1К	20—25	2—9	0,03—0,05	Маятниковый угломер
Заточить вспомогательную заднюю поверхность		Для заточки задних поверхностей	ЧЦ 150×80×32 24А25СМ1К	20—25	—5	0,03—0,05	То же
Довести переднюю поверхность по фаске		Для заточки передних поверхностей	ЛЧК 150×32×10×3 Л10—Л12 С1—СТ1 К 100%	30—40	1,5—2,0	Ручная подача с силой 1—2 кгс	Маятниковый угломер, лупа пятикратная со шкалой

Продолжение таб. 2.124

Наименование операции	Эскиз обработки	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки			Измерительный инструмент
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	
Довести заднюю поверхность по фаске и радиусу при вершине		Для заточки передних поверхностей	ЛЧК 150×32×10×3 Л10—Л12 С1—СТ1 К 100%	30—40	1,5—2,0	Ручная подача с силой 1—2 кгс	Маятниковый угломер, лупа пятикратная со шкалой

Таблица 2.125

Типовой технологический процесс заточки фрезы с ножами, оснащенными пластинками из твердого сплава на станке 3Б667 (вариант абразивно-алмазной обработки)

Наименование операции	Эскиз обработки	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки			Охлаждение
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	
Заточить заднюю поверхность по главной режущей кромке предварительно		Оправка	ЧК или ЧЦ63С (40—25) СМ1—М3К или СМ2—СМ1Б	12—15	5—10	0,08—0,10	Без охлаждения

Продолжение табл. 2.12а

Наименование операции	Эскиз обработки	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки			Охлаждение
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	
Заточить заднюю поверхность по переходной режущей кромке предварительно		Оправка	ЧК или ЧЦ63С (40—25) СМ1—М3К или СМ2—СМ1Б	12—15	5—10	0,08—0,10	Без охлаждения
Заточить заднюю поверхность по фаске предварительно		Оправка	ЧК или ЧЦ63С (40—25) СМ1—М3К или СМ2—СМ1Б	12—15	5—10	0,08—0,10	То же
Заточить заднюю поверхность по главной режущей кромке окончательно		Универсальная головка	АЧК 150×10×32 АСО80/63МВ1 (ТМ2, Б1) 100%	20—25	1—2	0,03—0,05	С охлаждением
Заточить заднюю поверхность по переходной режущей кромке окончательно		То же	АЧК 150×10×32 АСО80/63МВ1 (ТМ2, Б1) 100%	20—25	1—2	0,03—0,05	То же

Продолжение табл. 2.125

Наименование операции	Эскиз обработки	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки			Охлаждение
				v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	
Заточить заднюю поверхность по фаске окончательно		Универсальная головка	АЧК 150×10×32 АСО80/63МВ1 (ТМ2, Б1) 100%	20—25	1—2	0,03—0,05	С охлаждением

Таблица 2.126

Типовой технологический процесс заточки машинных разверток из быстрорежущих сталей

Наименование операции	Эскиз обработки	Станок (модель)	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки				Измерительный инструмент
					v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	s, м/мин	
Заточить переднюю поверхность		3А64М, 3А64, 3В642	Центры	Л1Т125×12×32×1—2×3 Л5, Л8Б1, КБ, Б156 100%	35—40	1,5—2,0	0,03—0,05	—	Штангенциркуль, угломер
Шлифовать калибрующую часть предварительно		3А150	Центры, хомутик	ПП 300×32×127 23А, 24А 25—16 СМ1—СМ2К	20—35	2—3	0,01—0,02	200	Микрометр

Продолжение табл. 2.126

Наименование операции	Эскиз обработки	Станок (модель)	Приспособление	Характеристика круга	Режим обработки				Измерительный инструмент
					v, м/с	v_1, м/мин	t, мм/дв. ход	s, м/мин	
Шлифовать калибрующую часть окончательно		3А150	Центры, хомутик	ЛПП 320×16×76×5 Л5—Л8С1—СТ1К 100%	23—25	1—2	0,005—0,01	200	Микрометр
Шлифовать обратный конус на калибрующей части		3А150	То же		20—25	2—3	0,01—0,02	200	Микрометр
Шлифовать режущую часть		3А150	То же	ПП 300×32×127 23А, 24А, 25—16 СМ1—СМ2К	20—25	2—3	0,01—0,02	200	Микрометр
Шлифовать направляющую фаску		3А150	То же		20—25	2—3	0,01—0,02	200	Микрометр

Глава 3

ОТДЕЛОЧНАЯ АБРАЗИВНАЯ И АЛМАЗНАЯ ОБРАБОТКА И ЛЕНТОЧНОЕ ШЛИФОВАНИЕ

§ 3.1. Хонингование

Назначение и сущность процесса, кинематика и схемы обработки

Хонингование применяют для повышения точности формы, размеров и снижения шероховатости поверхностей деталей машин в условиях серийного и массового производства после операций растачивания, обтачивания, шлифования, развертывания, зенкерования и протягивания.

Обработку производят с помощью абразивных или алмазных брусков, которым сообщают, как правило, три движения по отношению к детали: вращение, возвратно-поступательное перемещение и радиальную подачу.

При вибрационном хонинговании на основное возвратно-поступательное или вращательное движение хонинговальной головки или детали накладывается дополнительное круговое или возвратно-поступательное перемещение с малой амплитудой (обычно 1—4 мм) и частотой до 20 дв. ход/с.

Особенностью процесса хонингования является полное или частичное взаимное базирование обрабатываемой поверхности и режущей поверхности брусков, которое обеспечивается конструктивно за счет четырех или двух степеней свободы, сообщаемых инструменту относительно обрабатываемой детали или наоборот. Эта особенность определяет способы крепления инструмента и детали.

В соответствии со схемой хонингования (рис. 3.1, *а*) хонинговальная головка жестко связана со шпинделем станка, а детали с приспособлением сообщают две степени свободы. Эта схема применима для деталей, у которых нижняя и верхняя опорные плоскости параллельны друг другу, а оси обрабатываемого отверстия перпендикулярны опорной плоскости. Схема, показанная на рис. 3.1, *б*, является разновидностью схемы на рис. 3.1, *а*. Приспособлению с закрепленной деталью сообщают от двух до четырех степеней свободы. Эта схема рекомендуется для обработки мелких и среднегабаритных деталей. Если приспособлению сообщено только две степени свободы, то необходимо, чтобы деталь имела одну опорную базовую поверхность, перпендикулярную оси отверстия.

При хонинговании отверстий в тяжелых корпусных деталях типа блоков цилиндров целесообразно применять шарнирное крепление хонголовки и жесткое крепление обрабатываемой детали. Если несоосность шпинделя и обрабатываемого отверстия менее 0,03—0,05 мм, может быть применено одношарнирное крепление хонинговальной головки (рис. 3.1, *в*). При несоосности более 0,05—0,08 мм необходимо использовать двухшарнирное крепление (рис. 3.1, *г*).

В некоторых случаях, например при обработке тонкостенных гильз блока *цилиндров, корпусов гидрораспределителей, когда трудно обеспечить соосность* шпинделя и обрабатываемого отверстия, кроме двухшарнирного крепления хонинговальной головки, сообщают от двух до четырех степеней свободы обрабатываемой детали (рис. 3.1, *д*).

Хонингованием обрабатывают цилиндрические отверстия сквозные, ступенчатые и глухие с гладкой поверхностью и пересеченные шпоночными, шлицевыми пазами, кольцевыми канавками, окнами различной формы. В последние годы разработан процесс и создан станок для хонингования поверхности наружного диаметра шлицевых отверстий.

Процесс шлицехонингования осуществляют по принципу осевого хонингования с периодическим поворотом хонинговальной головки для уменьшения неравномерности износа брусков и повышения точности обработки.

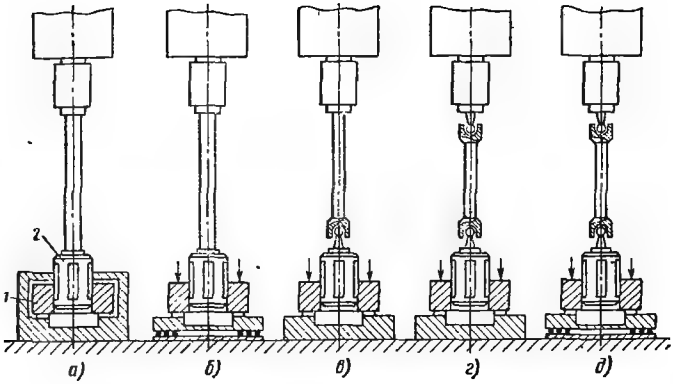


Рис. 3.1. Схемы крепления детали и инструмента при хонинговании отверстий:

1 — обрабатываемая деталь; *2* — хонголовка

В практике встречаются примеры хонингования конических и некруглых отверстий. Однако в этом случае с помощью хонингования обеспечивают лишь уменьшение шероховатости поверхности и не повышают точности размеров, так как в хонинговальных головках, предназначенных для указанных целей, прижим брусков к обрабатываемой поверхности осуществляется эластичным элементом.

Хонингование применяют и для обработки наружных цилиндрических поверхностей. Модификацией наружного хонингования является охватывающее алмазное хонингование. Этот метод нашел применение при обработке наружных цилиндрических поверхностей поршневых колец, собранных в пакеты.

С помощью хонингования могут быть обработаны самые различные материалы: незакаленная и закаленная сталь, серый, легированный и закаленный чугун, хром, никель, алюминий, бронза, различные виды твердых сплавов. Применение абразивных или алмазных брусков обусловливается в каждом конкретном случае требованиями к качеству детали и технико-экономическими соображениями (см. гл. 8).

Характеристика, размеры и крепление алмазных и абразивных брусков

Алмазные бруски изготовляют из натуральных (А) и синтетических (АС) алмазных порошков марок АСР, АСВ, АСК, САМ, АСС (шлифопорошки) и АСМ (микропорошки).

Важным показателем пригодности алмазных порошков для изготовления хонинговальных брусков является их прочность. При обработке отверстий закаленных чугунных гильз, например, увеличение прочности алмазных зерен на раздавливание с 740 гс до 3250 гс повышает износостойкость брусков более чем в 10 раз при некотором повышении производительности. При хонинговании шлицевых отверстий стальных закаленных шестерен применение алмазов марки САМ вместо АСВ, т. е. увеличение прочности в 2,5—3 раза, позволяет вдвое увеличить стойкость инструмента. Поэтому для алмазного хонингования стали рекомендуют применять алмазы с прочностью не ниже, чем у марки АСВ, а для деталей из закаленного чугуна с прочностью не ниже, чем у марок АСК и САМ.

Алмазные бруски изготовляют на металлической, керамической и, в отдельных случаях, на органической связках. Наиболее часто алмазные бруски изготовляют на металлической связке марки М1. Освоено промышленное производство брусков на металлосиликатных связках типа МС (МС15, МС2, МС8, МС1 и др.). По специальным заказам заводы алмазного инструмента изготовляют бруски на никелевой связке, наносимой гальваническим способом на стальные подложки.

Таблица 3.1

Типаж алмазных и эльборовых хонинговальных брусков

Тип бруска	Эскиз	Предельные основные размеры, мм				
		L	B	H	s	R
Алмазный АБХ		25—100	2—6	2—16	1—3	3—150
Эльборовый ЛБХ		35—125	3—5	3—8	—	5—50

Примечание. L — длина бруска

Предусмотренные ГОСТ 16606—71 испытания брусков на производительность и шероховатость обработанной ими поверхности осуществляют выборочно.

Алмазные хонинговальные бруски изготовляют в соответствии с ГОСТ 16606—71. Брусок состоит из алмазоносного слоя (табл. 3.1) толщиной s и безалмазного слоя (корпуса). Корпус бруска изготовляют из мягких сталей или методом порошковой металлургии. В табл. 3.1 приведен типаж алмазных хонинговальных брусков. Обычно бруски крепят к колодкам хона пайкой припоями ПОС-30, ПОС-40 или ПОС-61. В отдельных случаях бруски приклеивают эпоксидной смолой с отвердителями. ИСМ АН УССР рекомендует следующий состав клея (в массовых частях): 100 смолы ЭД-6; 15 пластификатора-дибутилфталата; 40 наполнителя (мелкий стальной порошок); 10 отвердителя (полиэтиленполиамина). Перед приклеиванием поверхности необходимо тщательно обезжирить, например протиркой бензином и спиртом.

ГОСТ 16606—71 не предусматривает бруски с механическим креплением, поскольку пока они нашли ограниченное применение из-за необходимости изготовления корпусов повышенной точности. Пример бруска с механическим креплением представлен на рис. 3.2. Крепление таких брусков к колодкам хона осуществляют двумя винтами, обычно с резьбой не меньше М5. Наличие жесткого и точного корпуса позволяет увеличить равномерность износа и коэффициент использования алмазоносного слоя. Опыт НИИтракторосельхозмаша показал, что алмазоносный слой брусков, аналогичных представленному на рис. 3.2, может быть увеличен до 5 мм, в связи с чем резко возрастает срок службы инструмента.

При выборе ширины алмазных брусков в хоне целесообразно принимать суммарную ширину брусков от 0,15 до 0,35 длины окружности обрабатываемого отверстия диаметром d_1. Следует использовать бруски возможно большей ширины, так как это ведет к более интенсивному съему металла и устранению исходной погрешности детали. Для улучшения подвода СОЖ и удаления отходов обработки в очень широких брусках рекомендуют прорезать узкие продольные пазы или делать их составными с промежуточным пазом.

Длину бруска L выбирают равной 0,7—1 длины обрабатываемого отверстия $L_д$, если отношение $L_д/d_1 < 1$. Если $1{,}5 \geqslant \frac{L_д}{d_1} > 1$, то обычно выбирают $L = (0{,}6 \div 0{,}85)L_д$, при $3 \geqslant \frac{L_д}{d_1} > 1{,}5$ длину брусков выбирают $L = (0{,}5 \div$

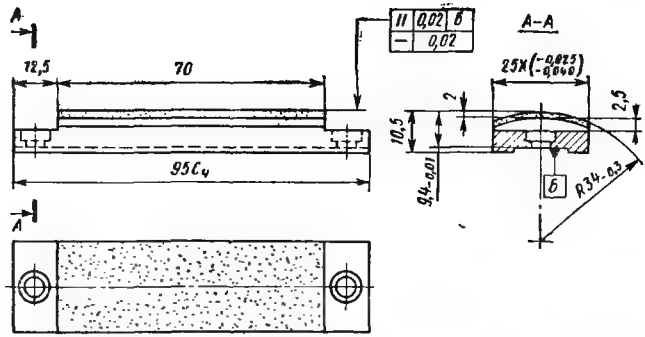


Рис. 3.2. Конструкция бруска с механическим креплением для хонингования шлицевых отверстий

$\div 0{,}75)L_д$. При обработке очень длинных отверстий выбор не связывают с длиной обрабатываемого отверстия. Если необходимо устранить непрямолинейность оси отверстия, то следует выбирать $L = (0{,}8 \div 1)L_д$, при этом важно обеспечить надежное «плавание» детали (или хона). Если этого не сделать, то возможно образование погрешности формы отверстия (корсетность).

Ширину брусков для обработки шлицевых отверстий выбирают с учетом размеров шлицев, с тем чтобы в любом положении хона по окружности брусок опирался не менее чем на два смежных выступа. Радиус режущей поверхности бруска R в этом случае выбирают равным (или на 0,5—1 мм меньше) радиусу обрабатываемого отверстия.

Характеристику алмазоносного слоя брусков выбирают в зависимости от свойств обрабатываемого материала, величины припуска на обработку и требуемой шероховатости поверхности. Рекомендации по выбору характеристики брусков приведены в табл. 3.2 и 3.3. Для эффективного удаления исходной погрешности формы отверстия следует выбирать из рекомендуемых алмазов большие по размеру и прочности.

Концентрация алмазов в бруске является важным параметром, определяющим экономические показатели процесса. Так, применение брусков с концентрацией 100% вместо брусков с концентрацией 50% при предварительном хонинговании серого чугуна увеличивает в 1,5—1,7 раза удельный расход алмазов, не повышая производительность и не снижая шероховатость поверхности. При хонинговании незакаленной и закаленной стали, наоборот, рекомендуется применять бруски с концентрацией 100%. При обработке отверстий малого диаметра и большой протяженности в стальных закаленных деталях типа плунжерных втулок топливных насосов целесообразно использовать бруски с концентрацией 150%.

Маркировку брусков производят в соответствии с ГОСТ 16606—71.

Хонинговальные бруски из эльбора. Для хонингования стальных закаленных деталей могут быть успешно применены бруски из эльбора. Размеры эльборовых хонинговальных брусков приведены в табл. 3.1.

Бруски из эльбора Л12 на керамической связке при хонинговании отверстий диаметром 66 мм в стали 38ХМЮА по интенсивности съема металла превосходят алмазные бруски той же зернистости на металлической связке, хотя износ последних меньше. Применяя бруски из эльбора при хонинговании закаленных сталей, можно снизить себестоимость операции примерно вдвое.

Наименьшая шероховатость обработанной поверхности, достигаемая при хонинговании брусками зернистостью Л12, соответствует $Ra = 0{,}32 \div 0{,}63$ мкм, а брусками ЛМ14 — $Ra = 0{,}08 \div 0{,}16$ мкм.

Абразивные бруски. Отечественная промышленность выпускает абразивные хонинговальные бруски типа БХ по ГОСТ 2456—67. Размеры этих брусков приведены в табл. 3.4. В отдельных случаях могут быть использованы бруски плоской и квадратной формы.

Таблица 3.2

Выбор марки алмаза и связки для хонинговальных брусков в зависимости от обрабатываемого материала и характера операции

Обрабатываемый материал	Характер операции	Марка алмаза		Связка
		Основная	Допускаемая	
Чугун серый и хромофосфористый	Предварительная	АСК, САМ	АСВ	М1
	Получистовая	АСК, САМ	АСВ	
	Окончательная	АСВ	АСР	МС1
Чугун серый закаленный и легированный, $HRG \geqslant 40$	Предварительная	АСС, АСК, САМ	—	М1, МВ4
	Получистовая	АСК, САМ		
	Окончательная	АСВ	—	МВ4
Сталь улучшенная	Предварительная	АСК, САМ	АСВ	М1, МС1
	Окончательная	АСВ	—	
Сталь закаленная, HRG 46—52	Предварительная	АСК, САМ	АСВ	М1, МС15
	Окончательная	АСВ	—	
Сталь закаленная и азотированная, HRG 58—65	Предварительная	АСС, АСК, САМ	АСВ	
	Окончательная	АСВ	—	
Алюминиевые сплавы анодированные	Предварительная	АСВ	—	Б2
	Окончательная	АСВ	АСР	
Хром $HV \geqslant 850$	Предварительная	АСК, САМ	АСВ	МС2, МС8
	Окончательная	АСР	—	

Примечание. Прочность зерен САМ по ТУ 2-037-71—72.

Таблица 3.3

Выбор зернистости алмазных брусков в зависимости от припуска и обрабатываемого материала

Припуск на диаметр, мм	Чугун								Сталь	
	серый		серый закаленный, *HRC* 40		серый закаленный, *HRC* 40		хромофосфористый		улучшенная	
	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм
0,15	315/250 250/200	5,0	200/160	5,0	315/250	5,0	315/250 250/200	5,0	200/160 160/125	2,5
0,10	200/160 160/125	2,5	200/160	2,5	200/160	2,5	160/125	2,5	160/125 125/100	2,5
0,08	160/125 125/100	2,5	160/125	2,5	160/125	2,5	125/100	2,5	125/100 100/80	2,5 1,25
0,06	125/100 100/80	1,25—2,5	125/100	2,5	125/100	2,5	100/80	1,25—2,5	100/80	1,25
0,04	80/63	1,25	80/63	1,25	80/63	1,25	80/63	1,25	80/63 63/50	1,25
0,02	40/28	0,63	40/28	0,32—0,63	40/28	0,32	40/28	0,32	63/50 40/28	0,63—1,25
0,01	28/20	0,32	28/20	0,32	28/20	0,32	28/20	0,32	28/20	0,32
0,005	20/14	0,16—0,32	20/14	0,16—0,32	20/14	0,16	20/14	0,16—0,32	20/14	0,16

Продолжение табл. 3.3

Припуск на диаметр, мм	Сталь						Хром *HV* 850		Анодированные алюминиевые сплавы *HRC* 30—35	
	закаленная *HRC* 46—52		закаленная *HRC* 58—62		азотированная *HRC* 62—65					
	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм	Зернистость	*Ra*, мкм
0,15	200/160	2,5	200/160	1,25—2,5	200/160	1,25	—	—	—	—
0,10	160/125	2,5	160/125	1,25	160/125	1,25	—	—	—	—
0,08	125/100	1,25—2,5	125/100	1,25	125/100	1,25	100/80	1,25	200/160	2,5
0,06	100/80	1,25	100/80	0,63—1,25	100/80	0,63	100/80 80/63	0,63—1,25	160/125	1,25
0,04	80/63	1,25	80/63	0,63—1,25	80/63	0,63	63/50	0,32—0,63	80/63	1,25
0,02	63/50	0,63	63/50	0,63	63/50	0,63	63/50	0,32—0,63	80/63	0,63—1,25
0,01	40/28	0,32	40/28	0,32	40/28	0,32	40/28	0,32	40/28	0,32
0,005	28/20	0,16	28/20	0,16	40/28 28/20	0,16	28/20	0,16—0,32	10/7	0,16

Таблица 3.4

Размеры шлифовальных брусков типа БХ

B, мм	*H*, мм	*L*, мм	*B*, мм	*H*, мм	*L*, мм
2	3	40	9	8	32 63
3	4,5 5	20 50	11	9	100 125
5	4	25 50	15	14	150
6	5	15 50			

Таблица 3.5

Выбор характеристики абразивных хонинговальных брусков в зависимости от припуска, обрабатываемого материала и шероховатости поверхности детали

Материал обрабатываемой детали	Припуск, мм	Шероховатость *Ra*, мкм		Характеристика абразивных брусков
		исходная	достигаемая	
Закаленная сталь	0,08—0,14 0,04—0,08 0,03—0,04 0,01—0,03	2,5 2,5 1,25 1,25	1,25 0,63 0,32 0,32	24А10 СТ1—СТ2К 24А6 С2—СТ2К 24А5 С2—СТ2К 63С3-5 С1-СТ1К 24А3-5 С1—СТ1К
Незакаленная сталь	0,04—0,07	2,5	0,63	63С10 СТ2—Т1К 24А10 С2—СТ2К
	0,02—0,04	1,25	0,63	63СМ40 СТ2—Т2К 63С4 СТ2—Т2К
	0,003—0,005	0,63	0,16	63СМ14—М28 СТ1—СТ2К
Закаленный серый чугун	0,08—0,16 0,04—0,08 0,01—0,03	2,5 1,25 0,63	1,25 0,63 1,32	63С16Т1—Т2К (бакелитизированные) 63С10—12Т1—Т2К (бакелитизированные) 63СМ40СМ2—С2К 63СМ4СМ2—С2К
Серый чугун	0,08—0,16 0,05—0,08 0,03—0,05 0,02—0,03 0,005—0,008 0,005—0,008	5,0 2,5 2,5 1,25 0,63 0,63	2,5 1,25 1,25 0,63 0,32 0,16	63С12—16Т1—Т2К 63С10—Т1—Т2К 63С10 СТ2—Т2К 63С6 СТ2—Т2К 63СМ20—М28 СТ2—Т2К 63СМ14—М20 СТ2—Т2К

Материал обрабатываемой детали	Припуск, мм	Шероховатость *Ra*, мкм		Характеристика абразивных брусков
		исходная	достигаемая	
Бронза, алюминий, латунь	0,09—0,15	2,5	0,63	24А10 СТ1—СТ2К 63С12 С1—СТ1К
	0,05—0,1 0,03—0,07 0,01—0,025	2,5 2,5 1,25	0,63 0,63 0,32	63С8-12 С1—СТ1К 63С5-8 СМ2—С2К 63СМ20—М40 М3—СМ1К

Характеристику абразивных хонинговальных брусков назначают в зависимости от вида обрабатываемого материала, требуемой шероховатости поверхности и припуска на обработку (табл. 3.5). Для хонингования металлов с высоким сопротивлением на разрыв (сталей, ковких чугунов) обычно применяют бруски из электрокорунда, а для хонингования металлов со сравнительно низким сопротивлением на разрыв (чугунов, алюминиевых сплавов и др.) бруски из карбида кремния. Зернистость абразивных брусков определяют в зависимости от припуска и требуемой шероховатости обработанной поверхности.

При выборе твердости абразивных брусков руководствуются твердостью обрабатываемого материала и величиной припуска на обработку. Кроме того, твердость брусков следует назначать с учетом режимов хонингования и составов применяемых СОЖ. Для хонингования стальных и чугунных деталей рекомендуются бруски на керамической связке, а для медных и алюминиевых сплавов — бруски на керамической или бакелитовой связках.

Абразивные бруски к стальным колодкам хонинговальной головки крепят либо наклеиванием с помощью шеллака, целлулоидного, бакелитового, силикатного и других клеев, либо механически, с помощью планок, винтов, плоских пружин и т. п. Надежное и быстрое закрепление брусков обеспечивает сухой шеллак. На колодку насыпают шеллак, оплавляют при 100—120° С, прижимают бруски и охлаждают. Для удаления изношенных брусков колодки нагревают.

Целлулоидный клей по объему состоит из 25—30% целлулоида и 70—75% ацетона. После нанесения клея бруски прижимают к колодкам и сушат при 30—40° С в течение 1 ч. Для снятия изношенных брусков достаточно опустить колодки с брусками в ацетон.

Выбор режимов

Назначение режимов хонингования состоит в выборе давления, с которым бруски прижимаются к обрабатываемой детали (p, кгс/см^2), скорости возвратно-поступательного перемещения хона или детали вдоль оси шпинделя (v_1, м/мин) и окружной скорости хона (v, м/мин).

Скорость возвратно-поступательного движения хонинговальной головки на предварительных операциях для обеспечения наибольшей производительности выбирают максимально возможной. У хонинговальных станков эти скорости обычно не превышают $v_1 = 15 \div 20$ м/мин, на чистовых операциях хонингования скорость v_1 должна быть на 20—50% меньше, чем на предварительных. Скорость вращения хонинговальной головки v выбирают исходя из следующих соотношений: $v/v_1 = 2 \div 4$ при хонинговании стали и $v/v_1 = 3 \div 5$ при хонинговании чугуна.

Производительность хонингования с увеличением скорости возвратно-поступательного движения v_1 повышается. С увеличением v производительность вначале повышается, а затем при достижении некоторого критического значения снижается. Производительность хонингования интенсивно растет с увеличением удельного давления брусков на обрабатываемую поверхность. Однако для каждой характеристики брусков как абразивных, так и алмазных существует

предельное давление, выше которого вести обработку не рекомендуется. При работе абразивными брусками превышение предельного давления приводит к их интенсивному износу и поломкам, а при работе алмазными брусками — обычно к засаливанию.

На предварительных операциях удельное давление брусков на обрабатываемую поверхность обычно находится в пределах $p = 10 \div 14$ кгс/см², а на окончательных $p = 3 \div 8$ кгс/см² Для снижения шероховатости поверхности следует принимать меньшие удельные давления брусков, а при больших припусках на обработку удельные давления должны быть повышены до предельных значений. Заданные давления можно поддерживать дозированной радиальной подачей брусков хона от 0,1 до 3 мкм/дв. ход. Рекомендации по выбору режимов алмазного хонингования приведены в табл. 3.6, абразивного хонингования в табл. 3.7.

Таблица 3.6

Режимы алмазного хонингования

Материал	Характер операции	v, м/мин	v_1, м/мин	p, кгс/см²	s, мкм/дв. ход
Серый закаленный чугун	Предварительная Получистовая Окончательная	50—80 45—70 40—50	16—18 16—18 12—16	13—15 13—15 5—9	—
Серый чугун	Предварительная Окончательная	50—80 40—70	15—18 8—12	8—12 4—6	2—3 0,6—0,8
Незакаленные стали	Предварительная Окончательная	25—35 25—35	6—12 3—8	4—6 2—4	1—2 0,4—0,6
Закаленные стали	Предварительная Окончательная	40—50 40—55	5—8 4—6	8—14 4—8	1—3 0,4—0,6
Хром	Предварительная Окончательная	12—20 12—20	6—8 5—7	4—6 3—5	—
Анодированный алюминий	Окончательная	20—25	10—12	3—4	—

Таблица 3.7

Режимы абразивного хонингования

Материал	Характер операции	v, м/мин	v_1, м/мин	p, кгс/см²
Серый закаленный чугун	Предварительная Получистовая Окончательная	50—80 50—60 40—50	15—20 12—16 8—12	8—14 8—12 6—8
Серый чугун	Предварительная Окончательная	40—80 30—50	17—22 8—15	8—10 3—5
Незакаленная сталь	Предварительная Окончательная	15—30 10—30	8—12 5—7	4—8 2—4
Закаленная сталь	Предварительная Окончательная	20—40 20—30	5—8 4—7	10—15 6—10
Бронза	Окончательная	40—70	4—8	3—5

Точность обработки

Хонингованием может быть получена высокая точность геометрической формы обрабатываемых поверхностей. Для устранения погрешности формы детали в продольном сечении (конусообразности, бочкообразности и корсетности) в большинстве случаев достаточно правильно выбрать длину брусков L и величину «перебега» за край отверстия $(1/3—1/4)L$. В поперечном сечении погрешности формы отверстия исправляются менее интенсивно.

При использовании хонинговальных головок с длинными брусками возможно исправление непрямолинейности оси отверстия.

Хонингование алмазными брусками по сравнению с абразивными позволяет получить более высокую геометрическую точность обрабатываемых поверхностей.

Большое влияние на исправление овальности у жестких толстостенных деталей оказывает удельное давление на поверхности контакта брусков с деталью. Интенсивность исправления овальности удобно оценивать коэффициентом

$$K = \frac{\delta_1 - \delta_2}{\Delta D},$$

где δ_1 и δ_2 — соответственно исходная и конечная овальность отверстия, мм; ΔD — съем металла на диаметр, мм.

Как показали эксперименты при обработке отверстий стальных закаленных шестерен хонинговальной головкой с высокой радиальной жесткостью алмазными брусками характеристики А200/160М1 100%, при исходной овальности $\delta_1 = 0{,}05$ мм и увеличении удельного давления с 5 кгс/см² до 26 кгс/см² коэффициент K увеличился с 0,4 до 0,59.

В случае хонингования тонкостенных деталей типа гильз блока цилиндров дизельных двигателей уже при небольших радиальных силах обрабатываемое отверстие, имеющее некруглую форму, деформируется в круглое. Дальнейшее повышение давления, превышающее минимальное, необходимое для этой деформации, нецелесообразно, так как приводит к снижению коэффициента K. Время, необходимое для уменьшения некруглости тонкостенных деталей от δ_1 до δ_2, может быть рассчитано по формуле

$$\tau = \frac{a_1}{b_1} - \sqrt{\frac{a_1^2}{b_1^2} - \frac{120R^2 m p_0}{EJb_1} \ln \frac{\delta_1}{\delta_2}}, \qquad (3.1)$$

где p_0 — давление, при котором была получена скорость съема, кгс/см²; m — коэффициент, зависящий от числа брусков хона, см/кгс.

Значение коэффициента m приведено ниже.

Число брусков хона	4	6	8
m	0,142	0,11	0,143

Коэффициенты a_1 и b_1, характеризующие режущую способность брусков, могут быть получены из экспериментальной зависимости скорости радиального съема металла w от времени шлифования τ:

$$w = a_1 - b_1\tau.$$

Силы резания

В процессе хонингования возникают радиальная P_y, тангенциальная P_z и осевая P_x составляющие силы резания, величины которых необходимо знать для расчета хонинговального станка, хонинговальной головки и приспособления. Для расчета тангенциальной, радиальной и осевой составляющих сил хонингования используют зависимости

$$P_x = f_x F p M;$$

$$P_y = pFM;$$

$$P_z = f_z p F M,$$

Таблица 3.8

Коэффициенты трения-царапания при алмазном хонинговании закаленной стали

Время хонингования, с	f_x		f_y		Время хонингования, с	f_x		f_y	
	Зернистость инструмента					Зернистость инструмента			
	А200/160	А80/63	А200/160	А80/63		А200/160	А80/63	А200/160	А80/63
5	0,71	0,58	0,42	0,36	35	0,47	0,36	0,33	0,26
15	0,62	0,46	0,38	0,30	45	0,41	0,33	0,33	0,25
25	0,55	0,42	0,34	0,28	60	0,35	0,31	0,29	0,23

где f_x, f_z — соответственно коэффициенты трения-царапания в осевом и тангенциальном направлениях (табл. 3.8); p — удельное давление брусков на обрабатываемую поверхность, кгс/см^2; F — площадь контакта одного бруска с обрабатываемой поверхностью, см^2; M — количество брусков.

Значения p могут быть приняты в соответствии с приведенными выше рекомендациями или рассчитаны исходя из параметров цилиндра расширения хона и его конструктивных размеров.

Давление хонинговальных брусков на обрабатываемую поверхность изменяется в начальный период обработки. Через 15—20 с после начала хонингования приработка инструмента заканчивается и в дальнейшем давление хонинговальных брусков сохраняет постоянное значение. Расчеты установившегося давления брусков показывают, что оно обратно пропорционально числу брусков в хоне, площади контакта одного бруска с обрабатываемой поверхностью и прямо пропорционально давлению в цилиндре расширения головки. Кроме того, при установившемся процессе хонингования давление брусков на обрабатываемую поверхность зависит от площади цилиндра расширения, угла конуса расширения (см. рис. 3.3) и приведенного коэффициента трения между деталями хонинговальной головки.

При расчетах элементов конструкции хонинговального станка, хонинговальной головки и приспособлений следует использовать наибольшее расчетное давление брусков на обрабатываемую поверхность, при котором процесс хонингования протекает нормально.

Значения P_x и P_z используют для расчета мощности хонинговального станка. Так как привод вращения хонинговальной головки, как правило, независим от привода возвратно-поступательного перемещения, то

$$N_x = \frac{1}{102 \cdot 60} P_x v \eta; \quad N_z = \frac{1}{102 \cdot 60} P_z v_1 \eta_1,$$

где η и η_1 — соответственно КПД привода вращения и возвратно-поступательного перемещения.

Рекомендации по выбору состава смазочно-охлаждающих жидкостей

В большинстве случаев лучших результатов при хонинговании стали и чугуна достигают при применении в качества СОЖ керосина или керосина с добавками масел, скипидара, олеиновой кислоты. Добавление в керосин 10—25% минерального масла хотя и уменьшает съем, но улучшает шероховатость поверхности, поэтому может быть рекомендовано для чистовых операций. Чистовое хонингование стали можно проводить также с применением керосина с парафином.

Однако керосин пожароопасен, сравнительно дорог и вреден. В некоторых случаях можно керосин заменить СОЖ, содержащими поверхностно-активные вещества и ингибиторы коррозии. В качестве поверхностно-активных веществ могут быть использованы животные и растительные жиры, а также (после предварительных испытаний на токсичность) кислоты (олеиновая и некоторые другие), сера, фосфор, их соединения и пр.

В качестве СОЖ при алмазном хонинговании закаленной стали используют водный раствор концентрата НСК-5, разработанного институтом химии присадок Академии наук Азербайджанской ССР. В состав НСК-5 входят следующие компоненты: 30% — натриевых солей кислого гудрона; 2,5% — азотнокислого натрия; 2,5% — тетраборокислого натрия; 15% — триэтаноламина; остальное вода. Испытания водного раствора НСК-5 в качестве СОЖ показали, что он обладает хорошими теплоотводящими, смазывающими, антикоррозионными свойствами. 5—10%-ный водный раствор НСК-5 успешно применяется на Челябинском тракторном заводе (ЧТЗ) при алмазном хонинговании шлицевых отверстий стальных закаленных шестерен из стали 20ХГНР. В результате внедрения водного раствора НСК-5 вместо мыльной эмульсии стойкость алмазных брусков увеличилась в 2,5 раза, удельный расход алмаза стал ниже, а производительность процесса выше, чем при использовании керосина.

При предварительном хонинговании для очистки СОЖ от шлама и случайных загрязнений достаточно использовать магнитный сепаратор с отстойниками. При окончательном хонинговании такой очистки недостаточно. В этом случае используют бумажные фильтры или центрифуги. Для тонкой очистки СОЖ находят применение гидроциклоны. Гидроциклоны диаметром 5, 7 и 10 мм полностью очищают СОЖ от частиц размером 16 мкм и более и позволяют удалять из СОЖ до 75—94% твердых частиц размером 6—15 мкм.

Качество очистки СОЖ оценивают по массовому содержанию частиц шлама, которое не должно превышать 0,015%.

Конструкция хонинговальной головки

Выбор конструкции хонинговальной головки определяется требованиями к точности обработки, конфигурацией, размерами и массой обрабатываемой детали, конструкцией хонинговального станка, масштабом производства и характером операции.

Хонинговальная головка (рис. 3.3) состоит из присоединительной и рабочей частей. Соединение хона со станком осуществляют посредством специального патрона со встроенным вторым карданом.

При абразивном хонинговании присоединительная часть имеет устройство для ручного изменения исходного положения штока расширения хона для периодической компенсации износа брусков. На современных станках предусмотрена возможность бесшарнирной связи рабочей части хона со шпинделем станка. В этом случае в присоединительной части отсутствуют наружный и внутренний карданы. В отдельных случаях используют хонинговальные головки с одним внешним или внутренним карданом.

В конструкциях хонголовок нашли применение карданы двух видов: шаровой и с шипами. Расчеты, проведенные в НИИтракторосельхозмаше, показали, что кардан с шипами обеспечивает лучшее «плавание» хона. Поэтому там, где это возможно, следует применять кардан с шипами.

Зазор между колодкой бруска и корпусом следует выбирать минимально возможным. Для хонинговальных головок средних размеров эта величина обычно составляет 0,02—0,03 мм. Корпус хона, конус расширения и колодки рекомендуется изготовлять из стали ХВГ, закаленной до *HRC* 50—60; допускается использование стали 40Х, закаленной до *HRC* 40—45. Высокие требования должны быть предъявлены к точности изготовления конуса расширения и колодок брусков, так как от них зависит равномерность износа режущего слоя брусков. В табл. 3.9 приведены распространенные варианты конструкций узла расширения брусков и области их применения.

Для обработки шлицевых отверстий используют хонинговальную головку, показанную на рис. 3.4. Бруски *1* крепятся механически, для этого после на-

Таблица 3.9

Варианты конструкции и области применения конусов расширения и колодок

Варианты конструкции	Область применения
	Абразивное хонингование отверстий диаметром свыше 10 мм
	Хонингование разобщенных поверхностей (шлицевые, шпоночные отверстия)
	Одновременное хонингование нескольких соосных отверстий длинными брусками
	Хонингование глухих отверстий
	Хонингование отверстий диаметром до 30 мм: абразивное (эск. *а*) алмазное, в том числе отверстий плунжерных втулок (эск. *б*)

прессовки и спекания алмазоносного слоя в подложке выбирают паз для базирования бруска на выступ колодки *2*. Сжатие брусков осуществляют штифтами *3*. Эта конструкция успешно используется на ЧТЗ для хонингования шлицевых отверстий шестерен трактора. По сравнению с напаянными брусками, применяемыми на Орловском заводе шестерен для обработки этих же деталей, износостойкость брусков с механическим креплением на ЧТЗ увеличилась более чем в 2,5 раза.

Для хонингования глухих отверстий предназначен хон, показанный на рис. 3.5. Этот хон отличается от обычных конструкций тем, что бруски *1* выдвинуты к самому торцу корпуса *2*. Для надежного ввода хона в отверстие предназначены текстолитовые планки *3*, имеющие большие заходные фаски. Бруски *1* разжимаются механизмом станка через шток *4* и конус *5*, а возвращаются в исходное положение плоскими пружинами *6* и кольцевой пружиной *7*. Присоединительную часть хона вставляют в байонетный патрон шпинделя станка. Для получения точной геометрической формы при хонинговании глухих отверстий с недостаточной

величиной вывода хона рекомендуется применять периодическую правку брусков или использовать бруски уменьшенной длины, чтобы обеспечить выход в пределах 0,25—0,35 от их длины. В отдельных случаях бруски периодически в конце хода задерживают на короткое время у основания глухого отверстия. Регулируя время задержки, можно компенсировать уменьшенную величину выхода брусков.

Для повышения точности формы при хонинговании глухих отверстий может быть использована хонинговальная головка с ускоренным расширением брусков у ее конца, что обеспечивается увеличением ближайшего к глухому торцу детали угла конуса расширителя.

Для хонингования прецизионных отверстий малого диаметра и большой глубины, например в деталях топливной аппаратуры, предназначена хонинго-

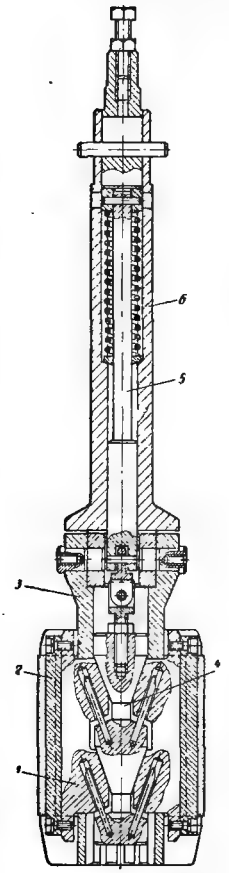


Рис. 3.3. Хонинговальная головка для обработки алмазными брусками отверстий в гильзах цилиндров:

1 — колодка; 2 — брусок; 3 — корпус хона; 4 — конус расширения; 5 — шток; 6 — корпус

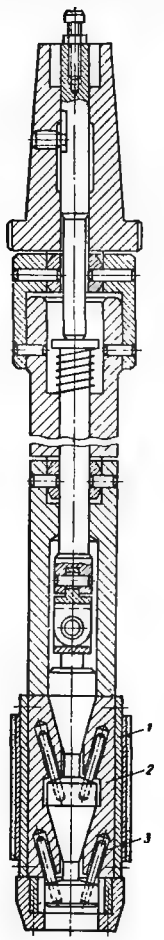


Рис. 3.4. Хонинговальная головка для обработки шлицевых отверстий

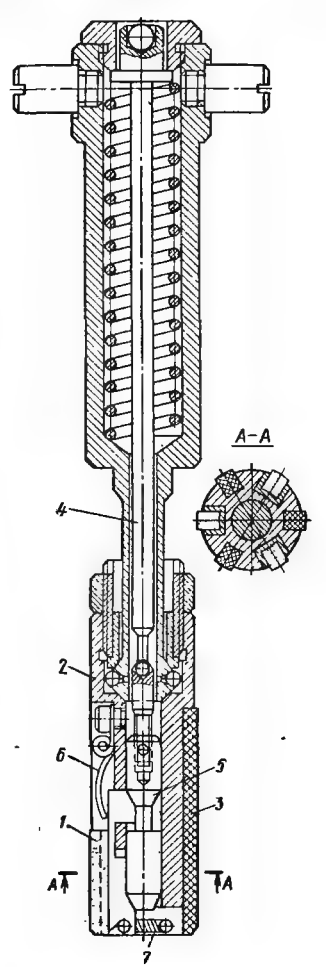


Рис. 3.5. Хонинговальная головка для обработки глухих отверстий

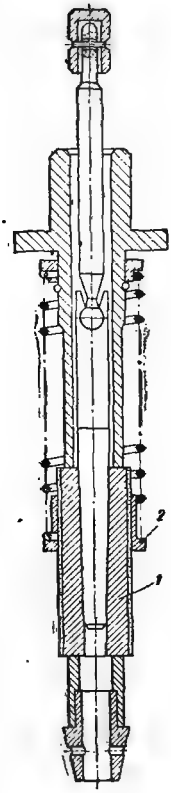
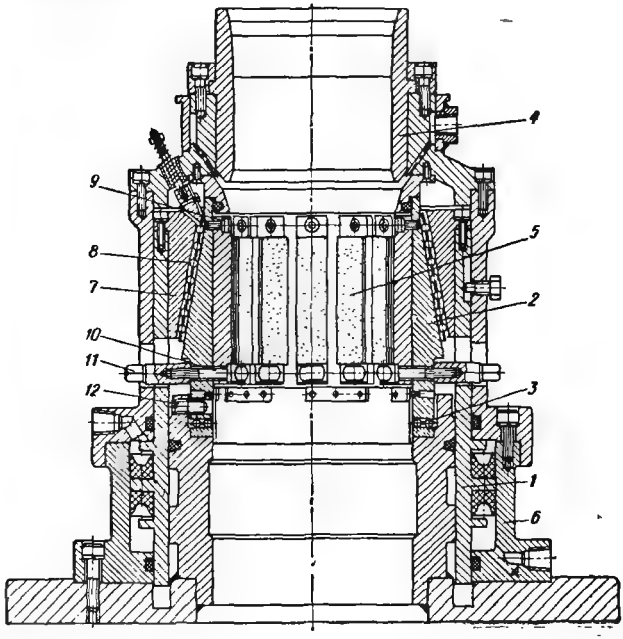


Рис. 3.6. Хонинговальная головка для обработки прецизионных отверстий малого диаметра и большой длины

Рис. 3.7. Хонинговальная головка для охватывающего алмазного хонингования наружных цилиндрических поверхностей



вальная головка, показанная на рис. 3.6. Головку жестко закрепляют в шпинделе хонинговального станка. Для предотвращения выпадания брусков *1* при выводе хонинговальной головки из обрабатываемого отверстия имеется подпружиненное кольцо *2*, которое во время каждого хода упирается в торец детали и не мешает протеканию процесса. Угол конуса равен 3—6°. Толщина режущего слоя бруска для отверстий диаметром 8—12 мм обычно не превышает 1 мм.

На рис. 3.7 показана установка для охватывающего наружного хонингования цилиндрических поверхностей. В шпинделе станка устанавливают устройство для крепления и ориентации обрабатываемых поршневых колец. До начала хонингования поршень *1* находится в верхнем крайнем положении, а имеющая продольную прорезь деформируемая гильза *2* в свободном состоянии опирается на шарики *3*. После сборки в ориентирующей гильзе *4* пакет поршневых колец опускается в зону алмазных брусков *5* и ему сообщаются вращательное и возвратно-поступательное движения. Одновременно в верхнюю и нижнюю полости цилиндра *6* от специального гидропровода подается масло, причем давление в верхней полости превышает давление в нижней. В результате этой разницы давлений поршень *1* опускается вниз, а обжимный конус *7* через шарики *8* действует на разрезную гильзу *2*, которая сжимается, и алмазные бруски *5*, жестко привернутые к ней винтами *9*, болтами *10* и гайками *11*, перемещаются по окружности и в радиальном направлении, плавно охватывая движущийся пакет поршневых колец. Во время хонингования гильза *2* удерживается фиксатором *12* от проворота. После окончания цикла хонингования поршень *1* под действием масла

поднимается вверх, освобождая от нагрузки эластичную гильзу *2*. При этом бруски *5* отходят от обрабатываемой поверхности.

Использование установки для охватывающего хонингования значительно повышает точность обработки поршневых колец.

§ 3.2. Суперфиниширование

Виды суперфинишных операций

Суперфиниширование — процесс отделочной обработки поверхностей деталей мелкозернистыми абразивными брусками. Характерным признаком процесса является колебательное движение брусков с частотой от 500—600 до 2000—3000 дв. ход/мин и амплитудой 2—5 мм. Суперфиниширование целесообразно применять для улучшения эксплуатационных свойств деталей, работающих в условиях трения скольжения и качения, поскольку с помощью этого процесса можно получить поверхность шероховатостью от $Rz = 0{,}050 \div 1{,}00$ мкм до $Ra = 0{,}080 \div 0{,}160$ мкм практически без волнистости, с минимальной огранкой (0,5 мкм), удалить дефектный поверхностный слой металла, образовавшийся при шлифовании, и достигнуть упрочнения поверхностного слоя без каких-либо структурных изменений. Все это, вместе с возможностью управления направлением и формой микронеровностей, позволяет рекомендовать суперфиниширование как наиболее эффективный вид отделочной обработки рабочих поверхностей для таких деталей, как кольца и ролики подшипников качения, коленчатые и распределительные валы, поршневые пальцы, клапаны, шпиндели и пиноли станков, различные гладкие и ступенчатые оси, роторы, калибры, штоки, поршни, золотники и др.

Сущность процесса суперфиниширования состоит в царапании обрабатываемой поверхности одновременно большим количеством (10^2—10^4 зерен/мм^2) мельчайших абразивных зерен. Основными видами взаимодействия зерен с металлом являются микрорезание со снятием тончайших (0,1—0,5 мкм) стружек и трение с пластическим оттеснением металла. Соответствующим выбором условий суперфиниширования (характеристика бруска, режимы обработки, смазочно-охлаждающая жидкость) можно обеспечить непрекращающееся резание металла в течение длительного времени. При интенсивном резании скорость съема металла достигает 1—1,5 мкм/с, происходит исправление погрешностей формы детали и удаление дефектного слоя. Далее, если это необходимо, переводят процесс в режим преобладающего граничного трения, при котором брусок выглаживает, полирует обрабатываемую поверхность, придавая ей зеркальный блеск.

Операции суперфиниширования можно классифицировать по следующим основным признакам (рис. 3.8): 1) по виду базирования деталей — центровое и бесцентровое; 2) по виду подачи — обработка врезанием и с продольной подачей; 3) по форме обрабатываемой поверхности — суперфиниширование цилиндрических, конических, тороидальных (желоба колец подшипников), торцовых плоских и сферических поверхностей.

Как правило, во всех случаях обрабатываемая деталь вращается со скоростью v_1, а брусок имеет колебательные движения со средней скоростью v_2. При обработке в центрах длинных деталей и бесцентровой обработке гладких деталей на проход имеется дополнительная продольная подача головки с бруском или деталей (при бесцентровой обработке). Суперфиниширование коротких (до 50—70 мм) участков поверхностей на деталях, имеющих ступени, буртики, производят методом врезания, когда длина бруска равна длине обрабатываемой поверхности либо меньше последней на величину амплитуды колебаний. При суперфинишировании торцовых плоских и сферических поверхностей в качестве инструмента чаще используют не брусок, а круг чашечной формы, вращающийся со скоростью v и имеющий колебательное или планетарное движение.

Суперфиниширование выполняют после шлифования, а для деталей, не подвергающихся термической обработке, после чистового и тонкого точения на специальных суперфинишных станках или на универсальных токарных и шлифовальных станках с установленными на них головками-вибраторами (в мелкосерийном и единичном производстве).

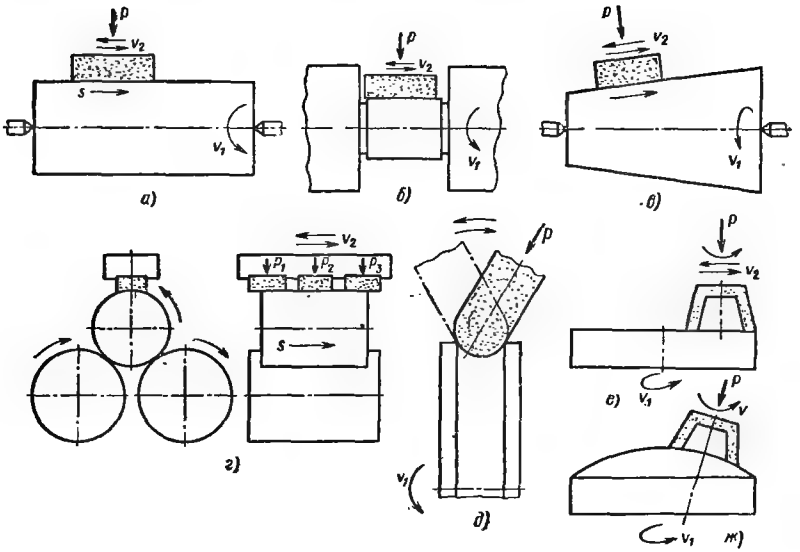


Рис. 3.8. Схемы суперфиниширования:

а — центровое в продольной подачей; *б* — центровое врезанием; *в* — конических поверхностей; *г* — бесцентровое; *д* — тороидальной поверхности (желоб кольца подшипника); *е, ж* — торцовых плоских и сферических поверхностей

Выбор характеристик брусков

Абразивный материал, связка. Рекомендации по выбору материала и связки брусков приведены в табл. 3.10. Наиболее часто применяют суперфинишные бруски из электрокорунда белого (марок 24А, 25А) и карбида кремния зеленого (марок 63С, 64С). При обработке закаленных сталей используют оба этих материала, при обработке чугуна и вязких, пластичных материалов целесообразно использовать бруски из карбида кремния. В отдельных случаях для получения шероховатости $Ra = 0{,}02 \div 0{,}04$ мкм используют бруски из хромистого электрокорунда (марок 33А, 34А) зернистостью М3—М1.

Суперфинишные бруски изготовляют на керамической связке. Литые бруски зернистостью М14—М5 следует использовать для основных операций суперфиниширования. Прессованные бруски зернистостью М40—М20 следует применять лишь на предварительных, черновых операциях, когда шероховатость поверхности $Ra = 0{,}16 \div 1{,}32$ мкм. Для чистовых операций суперфиниширования деталей из материалов, обладающих низкой твердостью и высокой пластичностью (цветных сплавов, титановых сплавов, нержавеющей стали), применяют бруски на бакелитовой связке с графитовым наполнителем. В ряде случаев (при обработке коленчатых валов, колец подшипников для приборов и др.) бруски на керамической связке пропитывают серой для уменьшения хрупкости и повышения прочности брусков, предотвращения сколов.

Бруски из эльбора на керамической связке целесообразно использовать при суперфинишировании стальных деталей высокой твердости, в первую очередь деталей из легированных сталей, имеющих в своей структуре карбиды, нитриды и другие составляющие, твердость которых близка к твердости обычных абразивных материалов. При суперфинишировании азотированной и цементированной стали интенсивность съема металла брусками из эльбора в 1,4—1,5 раза выше, а при обработке быстрорежущей стали в 5—7 раз выше, чем брусками из карбида кремния. Характерной особенностью брусков из эльбора является их высокая стойкость.

Таблица 3.10

Рекомендации по выбору абразивных материалов и связок для суперфинишных брусков

Области применения	Абразивный материал	Связка
Суперфиниширование стальных деталей	Белый электрокорунд	Керамическая
Окончательное суперфиниширование стальных деталей	Хромистый электрокорунд	»
Обработка деталей из чугуна и стали	Зеленый карбид кремния	»
Предварительное суперфиниширование деталей из цветных сплавов, незакаленной стали, нержавеющей стали	То же	Керамическая, металлическая
Окончательная обработка деталей и сплавов небольшой твердости	»	Бакелитовая с графитом
Суперфиниширование деталей из высокотвердых легированных инструментальных и конструкционных сталей	Эльбор	Керамическая
Суперфиниширование деталей из твердых сплавов и технической керамики	Алмаз	Органическая (бакелитовая, вулканитовая)

Таблица 3.11

Выбор зернистости бруска и числа последовательных переходов в зависимости от требуемой шероховатости поверхности

Исходная шероховатость *Ra*, мкм	Требуемая шероховатость, мкм							
	0,16		0,8		0,04		0,02	
	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость	Переход	Зернистость
1,25	I	М20; М14	I II	М14 М7	—	—	—	—
0,63	I	М14; М10	I II	М14 М7	I II III	М20; М14 М7 М3	—	—
0,32	I	М14; М10	I	М10; М7	I II	М14; М10 М3	I II III	М14, М10 М7; М5 М1
0,16	—	—	—	—	I II	М7 М3	I II	М7; М5 М1

Зернистость брусков определяется требованиями к шероховатости поверхности; в случае, если заданную шероховатость можно получить брусками смежных зернистостей, применяют бруски более крупнозернистые, обеспечивающие более интенсивный съем металла. При работе в несколько переходов зернистость брусков последовательно уменьшают. В табл. 3.11 приведены рекомендации по выбору зернистости брусков и количества переходов.

В табл. 3.12 приведены данные об интенсивности съема металла при суперфинишировании сталей брусками из КЗ и эльбора.

Твердость брусков. Выбор твердости брусков зависит в основном от материала и термической обработки детали. При суперфинишировании деталей из обычных конструкционных сталей можно руководствоваться правилом: чем тверже сталь, тем мягче брусок, и наоборот.

Ориентировочные данные по выбору твердости прессованных брусков при суперфинишировании деталей приведены ниже.

Твердость стали *HRC*, кгс/мм²	10—20	25—35	40—50	55—60	60—65
Степень твердости брусков	СМ1	М3—СМ1	М3	М1—М2	ВМ2-М1

Таблица 8.12

Интенсивность съема металла Q при суперфинишировании сталей брусками

Обрабатываемый материал	Бруски		Q, мм²/мин
	Зернистость	Материал	
20Х (*HRC* 60—63)	М28	Карбид зеленый	15—16
	М20	То же	13—13,5
	М14	»	10—11
	М14	Эльбор	16—17
	М10	Карбид зеленый	9—9,5
	М7	То же	6—7
	М3	»	2—3
	М1	»	1—1,5
38ХМЮА (*HRC* 62—65)	М14	Карбид зеленый	13—14
	М14	Эльбор	22—23
Р9Ф5 (*HRC* 63—66)	М14	Карбид зеленый	2—3
	М14	Эльбор	14—16
Р12Ф5 (*HRC* 65—67)	М14	Карбид зеленый	1,5—2
	М14	Эльбор	8—10

Литые бруски при прочих равных условиях следует брать на две-три степени тверже прессованных. При обработке дателей из мягких и вязких сталей и сплавов следует применять мягкие бруски твердостью ВМ—М2. При обработке чугуна твердость брусков следует повышать до степени С—СТ.

Приведенные выше рекомендации справедливы для обработки деталей с исходной шероховатостью $Ra = 0{,}32 \div 0{,}63$ мкм. При большей исходной шероховатости твердость брусков следует повышать. О правильном выборе твердости бруска свидетельствует его быстрая приработка к обрабатываемой поверхности, равномерный постоянный износ 5—10 мкм на 1 мкм съема металла (при угле сетки $\alpha = 30 \div 50°$) в течение длительного времени. При увеличении окружной скорости детали износ бруска должен резко уменьшаться и при $\alpha = 80 \div 85°$ практически прекратиться.

Твердость брусков из эльбора на керамической связке рекомендуется назначать в диапазоне СТ2—Т2, при которой износ бруска составляет 0,2—0,5 мкм на 1 мкм съема металла, а удельный расход эльбора 2—3 мг/г.

Выбор размеров и формы брусков и подготовка их к работе

Определение размеров и формы брусков. Одним из условий эффективного выполнения операции суперфиниширования является правильный выбор размеров бруска. Стандартные размеры и формы абразивных брусков приведены в табл. 3.13, а брусков из эльбора в табл. 3.14. Ширину рабочей поверхности бруска определяют из соотношения $B = kD$, где D — диаметр обрабатываемой детали; k — коэффициент, значения которого приведены в табл. 3.15.

Использование брусков шириной больше 20—25 мм нецелесообразно, так как это затрудняет доступ смазочно-охлаждающей жидкости в зону обработки и удаление отходов. При чрезмерной дуге контакта детали с бруском происходят частые сколы кромок. Для обработки деталей значительных размеров применяют одновременно два бруска и более, устанавливаемых в специальных державках (табл. 3.15).

При наличии на обрабатываемой поверхности канавок, пазов, окон ширина бруска должна быть не меньше двойной ширины канавки или паза. При суперфинишировании желобов колец подшипников качения ширина бруска (размер вдоль оси кольца) должна быть равна ширине желоба, высота бруска (размер вдоль желоба) не должна превышать 1,5 B, так как при большей ширине бруска происходит искажение формы желоба.

Таблица 3.13

Типаж абразивных брусков

Вид бруска	Тип	Эскиз	Предельные размеры, мм	Связка
Квадратный	БКв		$B = 3 \div 90$ $L = 20 \div 200$	Керамическая или бакелитовая
Плоский	БП		$B = 8 \div 40$ $H = 4 \div 20$ $L = 25 \div 200$	То же
Трехгранный	БТ		$B = 6 \div 16$ $L = 150$	Керамическая
Круглый	БКр		$D = 6 \div 16$ $L = 100 \div 150$	Керамическая
Полукруглый	БПкр		$D = 13 \div 20$ $L = 150 \div 200$	Керамическая

Таблица 3.14

Типаж эльборовых брусков

Тип бруска	Эскиз	Предельные размеры, в мм					
		L	B	H	l	h	R
ЛБП		15—50	2,5—25	2—20	3—15	—	—
ЛБС		70	8—16	16	—	6	5—15

Таблица 3.15

Коэффициент k для выбора ширины брусков в зависимости от диаметра детали

Диаметр детали D, мм	Коэффициент	Количество брусков	Диаметр детали D, мм	Коэффициент	Количество брусков
3—10	0,7—0,6	1	Св. 60 до 100	0,4—0,25	2
Св. 10 до 20	0,6—0,5	1	» 100 » 150	0,25—0,15	2—3
» 20 » 40	0,6—0,5	1	» 150	0,15 и менее	3—4
» 40 » 60	0,5—0,4	1			

Длина бруска при суперфинишировании методом врезания должна быть равна длине обрабатываемой поверхности или на величину амплитуды колебаний меньше ее. На практике максимальная длина бруска в большинстве случаев не превышает 50—70 мм; лишь при обработке особо длинных деталей используют бруски длиной 100—120 мм.

При обработке врезанием, когда длина бруска равна длине детали, имеется тенденция к образованию седлообразности обработанных поверхностей. Для устранения этого дефекта следует применять бруски с переменной по длине рабочей поверхностью. Такая форма бруска позволяет добиться одинакового съема металла по всей длине обрабатываемой поверхности. Так, например, при суперфинишировании шеек коленчатых валов брусками длиной 35—60 мм и шириной 20 мм седлообразность шеек составляет 4—5 мкм; радиусная выточка, позволяющая уменьшить среднюю часть ширины бруска до 10 мм, исключает седлообразность и снижает бочкообразность до 1—2 мкм. Профилирование брусков осуществляют на плоскошлифовальном станке обычным или алмазным кругом.

Эльборовые и алмазные бруски изготовляют, как правило, с радиусной (в соответствии с радиусом детали) рабочей поверхностью, что позволяет избежать длительной приработки бруска и непроизводительного расхода дорогостоящего материала.

Для повышения производительности на современных суперфинишных станках используют многобрусковые наладки, например для одновременной обработки нескольких шеек ступенчатого вала или шпинделя, обработки деталей больших диаметров, сокращения числа проходов при бесцентровой обработке, а также для быстрой смены брусков различной зернистости при их последовательном использовании.

Маркировку брусков производят в следующем порядке: тип бруска, размеры по ГОСТ, абразивный материал, зернистость, твердость, связка, особые обозначения (литые бруски — Л, пропитка серой для брусков из эльбора и алмаза — С), концентрация. У алмазных брусков на органической связке твердость не указывают.

Примеры маркировки: БП20×10×150 63СМ28СМ1КЛС; ЛБС8×16×70×6×5 ЛОМ14Т1К 100%; АБС6×6×50×40 АСПМ10Б 75%.

Подготовка брусков к работе. Бруски в державках суперфинишных головок крепятся, как правило, механически. Лишь в некоторых случаях (при использовании брусков небольших сечений, тонких) брусок наклеивают на колодку, которая механически крепится в державке.

Бруски предварительно прирабатывают к поверхности детали с помощью шлифовальной ленты зернистостью 16—25. Ленту натягивают на деталь абразивным слоем наружу. Для приработки можно использовать также деталь с грубо обработанной поверхностью или специальную оправку с алмазным слоем (радиус оправки равен радиусу обрабатываемой детали).

При использовании брусков из эльбора и алмаза, имеющих радиусную рабочую поверхность, предварительно производят правку — вскрытие этой поверхности с помощью свободных зерен карбида бора или карбида кремния зернистостью М28, которыми покрывают оправку. При приработке и правке брусок прижимают к поверхности детали-оправки с небольшим давлением (1—2 кгс/см^2), осуществляя осциллирующее движение бруска и медленное вращение детали.

Профилирование и правка рабочей поверхности бруска методом шлифования не рекомендуется, так как при этом происходит затупление зерен бруска и резкое снижение его режущей способности. После приработки необходимо притупить острые кромки бруска и тщательно промыть его рабочую поверхность.

Выбор режимов

Выбор скоростей рабочих движений. Угол сетки как кинематический критерий процесса. Кинематика суперфиниширования оказывает значительное влияние на скорость съема металла, износ бруска и качество обработанной поверхности. Важным фактором является угол сетки α, который определяется соотношением скоростей детали v_1 и брусков v_2 (см. рис. 3.8):

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{v_1}{v_2}.$$

В свою очередь,

$$v_1 = \frac{\pi D n}{1000},$$

где D — диаметр, мм; n — частота вращения детали, об/мин.

$$v_2 = \frac{2an}{1000},$$

где a — размах колебаний, мм; n — число двойных ходов бруска в минуту.

Величины v и α являются переменными, изменяющимися за один период колебаний бруска. Однако для практических расчетов используют их средние значения, определяемые по приведенным выше формулам.

Скорость продольной подачи детали или бруска v_3, как правило, значительно меньше, чем v_2, и при определении α не учитывается. Наиболее интенсивное резание металла и самозатачивание бруска осуществляется при $\alpha = 40 \div 50°$, т. е. когда $v_1 = v_2$. При увеличении или уменьшении α съем металла и износ бруска резко уменьшаются, происходит переход от резания к трению-полированию, от самозатачивания бруска к его затуплению. Шероховатость поверхности детали уменьшается, поверхность приобретает характерный блеск. Оптимальным является кинематический цикл обработки с изменением угла сетки α: на первом этапе для быстрого исправления погрешностей формы, удаления исходной шероховатости и дефектного слоя работают с $\alpha = 40 \div 50°$, а затем увеличивают α за счет повышения скорости вращения детали в 2—10 раз и более.

Рекомендации по выбору кинематического цикла суперфиниширования приведены в табл. 3.16. Чем выше абсолютные значения скоростей v_1 и v_2 при соблюдении оптимального соотношения между ними, тем эффективнее идет процесс суперфиниширования: больше съем металла в режиме резания, быстрее происходит сглаживание микрорельефа в режиме трения-полирования. Поэтому как правило, работают с максимальной для данного оборудования скоростью колебаний бруска v_2, а окружную скорость детали v_1 устанавливают с учетом соотношений, указанных в табл. 3.16. На современных суперфинишных станках частота колебаний бруска составляет 1500—2500 дв. ход/мин, рекомендуемые значения размаха колебаний 2—3 мм, скорость колебательного движения $v_2 = 8 \div 15$ м/мин.

В брусках из эльбора зерна длительное время сохраняют свою остроту, поэтому повышение v_1 в этом случае способствует увеличению съема металла. Однако во избежание образования налипов металла на рабочей поверхности бруска следует работать при скорости v_1 не больше 30—40 м/мин.

При суперфинишировании желобов колец подшипников качения поверхность контакта бруска с деталью непрерывно изменяется, а повышенные удельные давления в сочетании с высокой частотой колебаний обеспечивают самозатачивание бруска. На операциях супефиниширования желобов колец из стали ШХ15 рекомендуется повышать скорость v_1 до 60—80 м/мин при частоте колебаний 1200—1500 дв. ход/мин.

Таблица 3.16

Выбор кинематического цикла суперфиниширования

Шероховатость после обработки Ra, мкм	Число ступеней цикла	Угол сетки, $\alpha°$	$\frac{v_1}{v_2}$	Время обработки на каждой ступени в % от времени цикла
0,16	1	40—50	0,8—1,2	100
0,008	1 2	40—50 60—70	0,8—1,2 1,7—2,7	50—60 50—40
0,04	1 2 3	40—50 60—70 75—85	0,8—1,2 1,7—2,7 3,7—11,4	50—60 40—25 10—15
0,02	1 2 3 4	40—50 60—70 75—80 85—88	0,8—1,2 1,7—2,7 3,7—5,7 11,4—28,6	40—50 40—20 10—15 10—15

Выбор рабочего давления. Рекомендуемые величины давления на брусок при суперфинишировании закаленных сталей составляют для брусков зернистостью М40—М20 в пределах 3—4 кгс/см², для брусков зернистостью М14—М5 2—3 кгс/см², для брусков зернистостью М3—М1 1,5—2 кгс/см². Влияние давления на съем металла характеризуется данными, приведенными ниже.

Давление, кгс/см²	1	2	3	4	5	6
Относительная величина съема металла	1	1,4	1,9	2,3	2,5	2,7

При обработке металлов, имеющих низкую твердость (цветные сплавы, незакаленная сталь и др.), давление следует уменьшать до 1—2 кгс/см². Суперфинишировании желобов колец подшипников производят при повышенных давлениях ($p = 10 \div 15$ кгс/см²), что вызвано необходимостью достижения высокой производительности при относительно малых размерах рабочей поверхности бруска.

В ряде случаев рабочие циклы суперфинишировании осуществляют с переменным давлением: а) снижают давление на этапе трения-полирования; б) при работе по исходной шероховатости в пределах $Ra = 0{,}63 \div 2{,}5$ мкм вначале снижают давление, после удаления исходной шероховатости повышают его, а затем вновь снижают на этапе трения-полирования.

Продольную подачу при суперфинишировании в центрах принимают $s = 0{,}5 \div 1{,}2$ м/мин, при бесцентровом суперфинишировании $s = 0{,}3 \div 0{,}5$ м/мин.

Припуски на суперфиниширование зависят от исходной и требуемой шероховатости поверхности детали (табл. 3.17).

Таблица 3.17

Припуски на суперфиниширование

Шероховатость Ra, мкм		Припуск (на диаметр), мкм	Шероховатость Ra, мкм		Припуск (на диаметр), мкм
требуемая	исходная		требуемая	исходная	
0,16	1,25 0,63	20—25 10—15	0,04	0,32	8—10
0,08	0,63 0,32	10—15 8—10	0,02	0,32 0,16	8—10 3—5

Цикл обработки. На рис. 3.9 приведена схема цикла суперфиниширования, на которой показано изменение съема металла и шероховатости поверхности. Цикл складывается из времени удаления исходной шероховатости T_1, этапа резания T_2, времени перехода от резания к трению T_3 и времени трения полирования T_4. Как правило, время T_1 составляет 15—20%, T_2 40—50%, T_3 20—25% и T_4 20—25% от общего времени цикла.

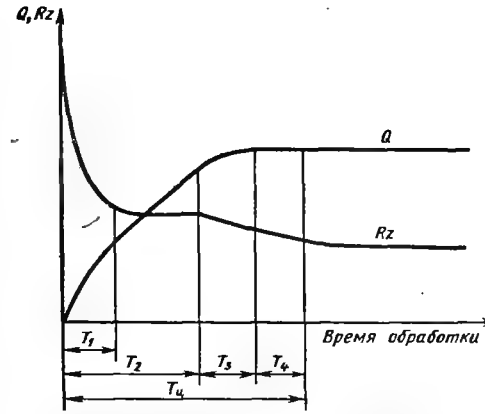


Рис. 3.9. Рабочий цикл суперфиниширования

Смазочно-охлаждающие жидкости. При обработке закаленных сталей в качестве СОЖ в большинстве случаев используют керосино-масляную смесь (85—90% керосина и 10—15% машинного масла, например машинное или индустриальное 20). В эту смесь добавляют 3-5% олеиновой кислоты. При обработке вязких, пластичных сталей и сплавов следует, во избежание наволакивания металла на брусок, применять СОЖ с увеличенным (до 70—80%) содержанием масла, из чистого масла или смеси легких масел с добавкой олеиновой кислоты.

Применение СОЖ на водной основе при обработке конструкционных сталей приводит к повышению шероховатости поверхности.

Необходима тщательная очистка СОЖ от отходов обработки, для чего современные суперфинишные станки оснащены магнитным и тонким бумажными фильтрами. Высокая степень очистки достигается также с помощью песчано-тканевого фильтра, представляющего собой камеру с мелкозернистым песком и несколькими перегородками с натянутой на них специальной тканью. Подачу СОЖ следует осуществлять достаточно обильной струей, направленной на входную (с учетом вращения детали) кромку бруска.

Точность и качество поверхности деталей, обработанных суперфинишированием. Суперфиниширование при наличии достаточного припуска в значительной мере исправляет некруглость (огранку) деталей. После суперфиниширования некруглость составляет 0,3—0,07 мкм.

Точность обработки суперфинишированием зависит от жесткости системы, включающей устройство для передачи давления на брусок, базирующие элементы и деталь. Лучшие результаты достигаются при передаче давления на брусок непосредственно от штока гидро- или пневмоцилиндра суперфинишной головки; наличие в этой системе пружин значительно (в 4—6 раз) замедляет исправление и уменьшает величину некруглости. Современные суперфинишные станки оснащены гидравлической системой прижима бруска с обратным клапаном, что обеспечивает исправление некруглости от 3—5 мкм до 0,8—1,5 мкм за 30 и до 0,3—0,7 мкм за 60—90 с.

При бесцентровом суперфинишировании роликов подшипников достигается исправление овальности от 0,8—1,2 мкм до 0,2—0,6 мкм за один проход; некруглости от 1,2—2,5 мкм до 0,4—1,0 мкм. При последующих проходах исправление некруглости значительно замедляется. Важным фактором при бесцентровом суперфинишировании является резкое уменьшение разноразмерности обрабатываемых деталей. Так, исходная разноразмерность роликов, равная 7—10 мкм, уменьшается после одного прохода до 2—4 мкм, а после двух-трех проходов до 1—2 мкм.

При центровой обработке нежестких деталей $\left(\frac{l}{d} > 10\right)$ следует работать головкой с двумя противоположно расположенными брусками. При этом интен-

Таблица 3.18

Данные об исправлении некруглости деталей при центровом суперфинишировании

Время обработки, с	ΔD, мкм			
	Гидравлическая головка с обратным клапаном	Пружинная головка	Обработка нежестких деталей	
			одним бруском	двумя брусками
0	6—7	6—7	6—7	6—7
30	0,8—1	3,5—4	3,5—4,2	5,5—6
60	0,5—0,7	2,5—3	2—2,5	4,5—5
90	0,3—0,6	1,5—2	1,3—1,8	3,5—4
120	0,3—0,5	1,2—1,5	1—1,2	3—3,5
150	0,3—0,5	1—1,5	0,8—1,2	2,5—3
180	0,3—0,5	1—1,2	0,8—1,2	2,2—2,8

сивность исправления некруглости повышается в 2—3 раза, а ее наименьшие значения составляют 0,8—1,2 мкм. В табл. 3.18 приведены данные об исправлении некруглости деталей в зависимости от схемы обработки и времени.

Точность формы детали в продольном направлении зависит от соотношения длины бруска и обрабатываемой детали, а также от величины перебега бруска за край обрабатываемой поверхности. При обработке с продольной подачей величина перебега бруска за край детали должна составлять 0,33—0,25 длины бруска; в этом случае отклонения от прямолинейности образующей не превышают 1—1,5 мкм. Исправление конусности при суперфинишировании может быть достигнуто при увеличении времени обработки на участке большого диаметра.

В результате суперфиниширования не только стабильно получают шероховатости поверхности до $Rz = 0{,}050 \div 1{,}00$ мкм, но и значительно повышают фактическую опорную поверхность деталей. В поверхностном слое металла после обработки суперфинишированием образуются остаточные напряжения сжатия, величина которых в режиме резания составляет 20—40 кгс/мм², а в режиме трения-полирования 60—90 кгс/мм²; глубина напряженного слоя — до 10 мкм, максимальные напряжения — на глубине 1—2 мкм. При суперфинишировании происходит упрочнение поверхностного слоя металла на глубину до 10 мкм у закаленной стали на 15—20%, у незакаленной стали на 30—40%. Причиной упрочнения является интенсивное измельчение кристаллических блоков и увеличение плотности дислокаций.

Таблица 3.19

Экономическая эффективность различных методов отделочной абразивной обработки валиков из стали 38ХМЮА (*HRC* 65—67)

Вид обработки	Затраты на капитальные вложения, тыс. руб.	Годовой выпуск деталей, шт.	Трудоемкость, мин	Технологическая себестоимость (на годовой выпуск), тыс. руб.
Суперфиниширование	8,95	500 1000 2000 5000	19,7	1,8 2,3 3,0 4,9
Тонкое шлифование кругами с графитовым наполнителем	20,98	500 1000 2000 5000	21,9	4,3 4,7 5,1 6,8
Полумеханическая доводка	9,51	500 1000 2000 5000	86,6	1,4 2,3 4,4 10,6

Трудоемкость и себестоимость операций суперфиниширования. В табл. 3.19 приведено сравнение трех вариантов отделочной обработки валика диаметром 60 и длиной 200 мм с исходной шероховатостью $Ra = 0{,}04$ мкм. Видно, что в условиях серийного, крупносерийного и массового производства наиболее эффективным методом является суперфиниширование. В условиях мелкосерийного производства суперфиниширование также может явиться экономически эффективным процессом, если использовать групповой метод обработки и учитывать эффект повышения качества деталей.

§ 3.3. Доводка

Назначение процесса доводки

Доводка является технологическим процессом финишной обработки высокоточных плоских деталей, отверстий малого диаметра, фасонных поверхностей, шариков для подшипников и др., а также применяется для притирки деталей, работающих в паре (зубчатые колеса, детали топливной и гидроаппаратуры). В результате доводки получаются погрешности размеров и формы не более 0,5—0,1 мкм и шероховатость $Ra = 0{,}01 \div 0{,}16$ мкм.

При доводке съем металла и формирование микрорельефа поверхности осуществляются в результате резания-царапания обрабатываемой поверхности большим количеством мельчайших абразивных частиц. В начальный период доводки, как правило, преобладает резание-царапание (вероятность 0,6—0,7), затем наблюдается постепенный переход к трению с пластическим оттеснением металла (вероятность резания 0,1—0,3).

Изменяя соотношение между резанием-царапанием и трением, можно управлять процессом доводки. Преобладание резания необходимо на предварительных операциях, где снимается основной припуск для исправления погрешности формы. На финишной стадии доводки, где основной задачей является получение малой шероховатости, следует вести доводку с преобладанием трения, когда абразивные зерна осуществляют своеобразное выглаживание поверхности.

При обработке хрупких материалов сущность взаимодействия абразивных частиц с обрабатываемой поверхностью иная, зерна образуют в поверхностном слое конусообразные трещины, при пересечении которых происходит выкалывание частиц материала. Вероятность образования трещин и глубина их распространения зависят от геометрии абразивных зерен и режимов доводки, в первую очередь давления.

В процессе доводки происходит очень быстрое (время порядка 10^{-2} с) образование окисных пленок и адсорбционных слоев на металлической поверхности, снижающих прочность поверхностного слоя и способность последнего противостоять разрушению. Эффективность химико-механического воздействия зависит от химической активности жидких компонентов абразивной пасты или суспензии, поэтому в состав последних вводят такие вещества, как олеиновая кислота, стеарин и др.

Процесс доводки протекает, как правило, в условиях граничного трения, когда поверхности притира и детали разделяет тонкий, но достаточно прочный граничный слой смазки. Нарушение нормальных условий трения вследствие разрыва этого слоя приводит к схватыванию на отдельных участках контакта притира с деталью, что резко ухудшает качество поверхности. Для улучшения смазывающих свойств доводочных смесей в них обязательно вводят масла или жиры животного происхождения, добиваясь оптимальной вязкости доводочной смеси.

Виды и особенности доводочных операций. В зависимости от типа инструмента различают два вида доводки: обработка свободным абразивом (пастами, суспензиями) и обработка закрепленным абразивом (абразивными кругами шаржированными притирами). Доводка свободным абразивом является менее совершенным процессом, требует больших затрат вспомогательного времени на нанесение пасты и промывку деталей. Существенным недостатком этого вида доводки является интенсивное шаржирование обрабатываемой поверхности

абразивными зернами, что отрицательно влияет на износостойкость деталей. Доводка закрепленным абразивом является перспективным процессом, значительно повышающим культуру труда, обеспечивающим более стабильные результаты по производительности и качеству поверхности. Исследования показали, что интенсивность шаржирования поверхности детали абразивом в этом случае резко уменьшается.

По способу подачи доводочной смеси различают доводку с непрерывной подачей смеси и с периодическим дозированным нанесением смеси на притир. При доводке с непрерывной подачей суспензия или жидкая паста непрерывно перемешиваются и подаются на рабочую поверхность притира. Отработанную смесь, прошедшую очистку от частиц металла через магнитный фильтр или сепаратор, используют многократно, до тех пор, пока измельчение абразивных зерен не приведет к заметному снижению производительности процесса. Непрерывную подачу абразивной смеси применяют на предварительных операциях, где требования к точности и качеству поверхности невысоки.

При доводке с периодическим нанесением пасты на притир необходимо вмешательство оператора или создание специальных дозирующих устройств.

Особой разновидностью процесса доводки является обработка принудительно шаржированными притирами. В этом случае предварительно производят шаржирование притира свободным абразивом для насыщения поверхностного слоя инструмента закрепленными абразивными зернами. В процессе доводки на поверхность притира наносят только слой смазки. Шаржированные притиры применяют, как правило, на финишных операциях, в сочетании с микропорошками зернистостью М7—М1. Доводка шаржированными притирами обеспечивает наиболее высокую точность (до ,01—0,3 мкм) и минимальную шероховатость ($Ra = 0{,}01 \div 0{,}04$ мкм) поверхности.

По результатам обработки доводочные операции можно разделить на грубые (точность 3—5 мкм, шероховатость $Ra = 0{,}16 \div 0{,}32$ мкм), чистовые (точность 1—2 мкм, шероховатость $Ra = 0{,}08 \div 0{,}16$ мкм) и тонкие (точность 0,1—0,5 мкм, шероховатость $Ra = 0{,}01 \div 0{,}04$ мкм). Строгая последовательность и постепенность выполнения операций является основой наиболее рациональной технологии доводки, когда на каждой из операций обеспечивается минимальное время доводки.

По количеству одновременно обрабатываемых поверхностей различают плоскую (обработка одной поверхности) и плоскопараллельную (одновременная обработка двух поверхностей) доводку. Последняя обеспечивает более высокую точность взаимного расположения двух параллельных поверхностей, так как деталь обрабатывают за одну установку. Так, при доводке плоскопараллельных концевых мер длины достигают отклонения от параллельности в пределах 0,07—0,3 мкм.

Абразивные микропорошки и пасты

Для доводки используют микропорошки из искусственных абразивных материалов: электрокорунда белого зернистостью М40—М1, электрокорунда нормального зернистостью М40—М7, карбида кремния зеленого зернистостью М40—М3, карбида бора зернистостью М40—М1. Для доводки используют также более мягкие искусственные абразивные материалы: окись алюминия (глинозем), прокаленную при различных температурах, и окись хрома. В небольших количествах применяют порошки и естественного корунда, в которых содержание корунда колеблется в зависимости от зернистости от 30 до 65%. Для доводки и взаимной притирки особо точных деталей применяют сверхтонкие электрокорундовые микропорошки, у которых размер зерен основной фракции составляет 0,7—0,5 мкм, 0,5—0,3 мкм, от 0,3 мкм и менее.

Абразивные доводочные пасты содержат такие компоненты, как олеиновая кислота, парафин, стеарин, керосин, масло (касторовое, костное). Содержание абразива в грубых и средних пастах составляет 50—80%, в тонких пастах 15—20%. В табл. 3.20 приведены составы паст, применяемых для доводки деталей топливной аппаратуры.

Таблица 8.20

Составы доводочных паст, %

Компоненты паст	Паста			Компоненты паст	Паста		
	М28	М5	М1		М28	М5	М1
Электрокорунд	70	70	—	Говяжий жир	—	—	46
Окись алюминия	—	—	14	Парафин	9	9	14
Олеиновая кислота	20	20	14	Керосин	1	1	12

При доводке пасты могут быть разбавлены до требуемой вязкости керосином или маслами (велосит, вазелиновое, касторовое и др.).

Пасты на основе окиси хрома (известные под названием паст ГОИ) имеют в составе, кроме окиси хрома (65—80%), олеиновую кислоту, стеарин (парафин), силикагель и жир.

Для доводки используют также абразивные суспензии, в которых абразив (не более 10% по массе) находится в жидкой среде во взвешенном состоянии. При доводке металлов в качестве жидкой среды используют керосино-масляную смесь с добавкой 3—5% олеиновой кислоты. При обработке неметаллов применяют водные суспензии. Для предотвращения оседания абразива в суспензию или жидкую пасту добавляют тонкодисперсную (размер частиц $4—40 \cdot 10^{-3}$ мкм) двуокись кремния в количестве до 10% по массе.

По применению доводочных смесей из различных абразивных материалов могут быть даны следующие обобщенные рекомендации. Для доводки деталей из термически обработанных сталей следует использовать смеси на основе электрокорундовых микропорошков. Для обработки неметаллов (полупроводники, стекло, керамика) целесообразно применение смесей на основе порошков карбида кремния. При доводке деталей из особо твердых неметаллических материалов (синтетический корунд, спецкерамика) применяют порошки карбида бора, которые используют также и в некоторых случаях при доводке высокотвердых стальных деталей, например резьбовых калибров. При доводке деталей из мягких материалов (цветных сплавов, незакаленной стали и т. п.) применяют более мягкие абразивные материалы — окись алюминия, окись хрома, естественный корунд. Эти же материалы используют для окончательной доводки высокоточных стальных деталей, где требуется получение наиболее низкой шероховатости ($Ra = 0{,}02 \div 0{,}04$ мкм) поверхности при съеме минимальных припусков. Мягкие абразивные материалы следует использовать также на окончательных операциях доводки деталей, работающих в условиях трения и износа, для обеспечения минимального шаржирования доведенной поверхности абразивными частицами.

Широкое распространение на доводочных операциях получили алмазные микропорошки. На основе алмазных микропорошков изготовляют и выпускают доводочные пасты. Данные о концентрации и работоспособности алмазных паст нормальной (Н) и повышенной (П) абразивной способности приведены в табл. 3.21.

Таблица 3.21

Алмазные пасты (ГОСТ 16877—71)

Зернистость	Концентрация алмазов, % по массе		Количество алмазов в 1 г пасты, карат		Зернистость	Концентрация алмазов, % по массе		Количество алмазов в 1 г пасты, карат	
	Н	П	Н	П		Н	П	Н	П
60/40	10	20	0,5	1,0	7/5	3	6	0,15	0,3
40/28	7	14	0,35	0,7	5/3	2	4	0,1	0,2
28/20	7	14	0,35	0,7	3/2	2	4	0,1	0,2
20/14	5	10	0,25	0,5	2/1	1	2	0,05	0,1
14/10	5	10	0,25	0,5	1/0	1	2	0,05	0,1
10/7	3	6	0,15	0,3					

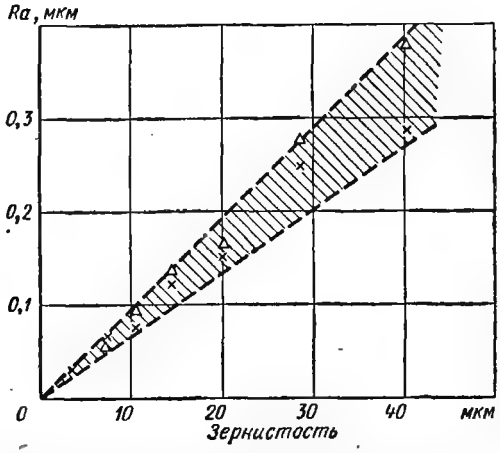


Рис. 3.10. Зависимость шероховатости поверхности *Ra* от зернистости алмазных (Δ) и эльборовых (×) паст (заштрихована область рассеяния значений *Ra* (сталь ХГ, *HRC* 62—65, $p = 1$ кгс/см²)

Применение алмазных порошков и паст наиболее эффективно при доводке деталей из твердых сплавов и высокотвердых закаливаемых инструментальных сталей, деталей из неметаллических материалов высокой твердости. В табл. 3.22 приведены некоторые данные об алмазных пастах.

Промышленностью освоен выпуск микропорошков и паст на основе эльбора. Выпускают пасты зернистостей М40—М3. Концентрация паст для зернистости М40 составляет 20%, для зернистостей М28—М10 10%, для зернистостей М7—М 36%. Интенсивность съема металла и шероховатость поверхности для эльборовых и алмазных паст практически одинаковы.

С увеличением зернистости шероховатость *Ra* линейно возрастает и для зернистостей М40—М3 изменяется в интервале 0,63—0,04 мкм (рис. 3.10).

Используя современное доводочное оборудование, можно с большой степенью точности обеспечивать постоянство режимов доводки: скорости, давления, времени, а также постоянство условий подачи абразивной смеси (количество смеси, периодичность дозировки). При этих условиях главным источником нестабильности процесса доводки является гранулометрический состав абразивных порошков. На рис. 3.11 представлены зависимости показателей процесса доводки от содержания предельной и крупной фракций в микропорошках при доводке стекла электрокорундом. Аналогичный характер зависимостей (при других численных значениях величин), получен для различных обрабатываемых и абразивных материалов и микропорошков зернистостью М3—М40.

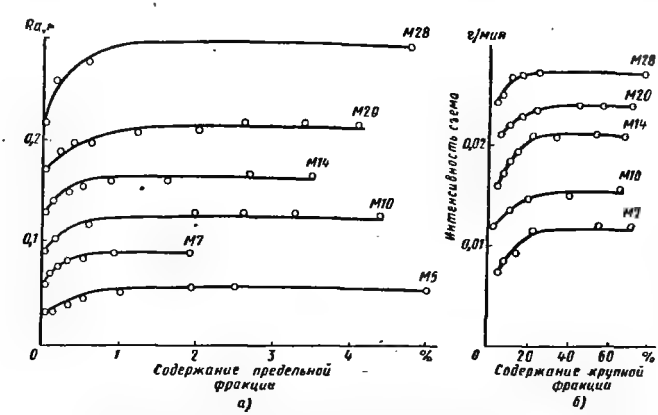


Рис. 3.11. Влияние содержания предельной (*а*) и крупной (*б*) фракций на показатели процесса доводки при обработке стали ХГ (*а*) и стекла К8 (*б*)

Таблица 3.22

Расход алмазов на съем 1 мкм припуска с 1 см² поверхности, (мг/мкм·см²)

Обрабатываемый материал	Пасты с алмазами			
	АСМ40	АСМ20	АСМ2	АСМ3
Сталь:				
инструментальная	0,02	0,018	0,020	0,021
быстрорежущая	0,028	0,024	0,026	0,026
Твердый сплав	0,024	0,022	0,025	0,025

На рис. 3.12 представлена зависимость съема стекла от времени обработки для трех видов электрокорундовых микропорошков зернистостью М10, у которых основная фракция (по числу зерен) составляет 60,7; 39,7; 24,4%, предельная фракция отсутствует, а крупная содержится в количестве 0,5—3,5%. Как в условиях непрерывной подачи абразивной смеси (линия *1*), так и при одноразовой подаче (линия *2*) значения съема одинаковы для всех микропорошков.

У микропорошков, в особенности микропорошков, применяемых для окончательной доводки, содержание предельной фракции не должно превышать для порошков М7—М40 по числу зерен 0,1—0,3% (1—3% по массе), для более тонких микропорошков 0,05—0,1% по числу зерен (0,5—1% по массе). Содержание крупной фракции должно составлять не более 10% по числу зерен (20—25% по массе) для порошков М20—М40 и 5—8% (15—20% по массе) для порошков М5—М14.

Притиры. Наиболее распространены в промышленности чугунные притиры. Чугун сочетает ряд свойств, делающих его наилучшим притирочным материалом: высокую износостойкость, необходимую для сохранения точной формы, специфическую структуру, где наряду с участками высокой твердости (цементит) имеются мягкие участки (феррит), наличие графитных включений, что улучшает условия трения.

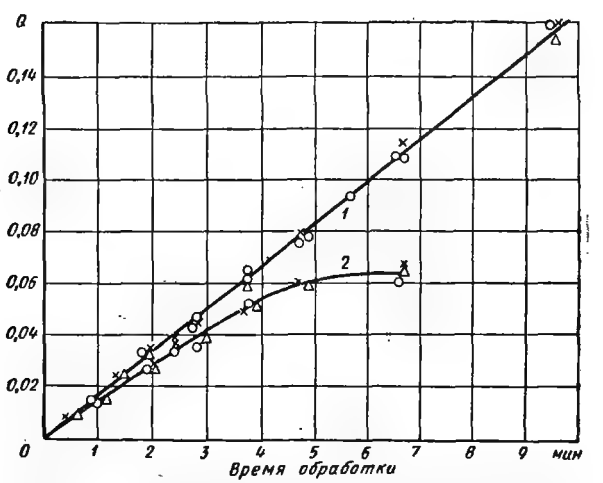


Рис. 3.12. Влияние содержания основной фракции (○ — 60,7%; × — 39,7%, △ — 24,4%) на съем *Q* материала — стекла К8

Лучших результатов при доводке достигают при использовании перлитного чугуна, причем чем мельче применяемый абразив, тем более тонкопластинчатую структуру должен иметь чугун. Твердость перлитного чугуна *НВ* 150—200.

Притиры можно изготовлять также из ферритного чугуна с повышенным (до 1%) содержанием фосфора. Высокотвердая фосфидная эвтектика в виде равномерной сетки обеспечивает повышение износостойкости притира. Наиболее благоприятной формой графитных включений является пластинчатая, а также шаровидная (в модифицированном чугуне); наличие розеточных и гнездообразных графитных включений увеличивает износ чугуна.

Имеются данные, свидетельствующие о целесообразности использования для притиров чугуна, легированного оловом и титаном, а также чугуна, полученного электрошлаковым переплавом и обладающего высокой однородностью структуры. При доводке мягких материалов (цветных сплавов, магнитных сплавов и др.) применяют притиры из оптического стекла, свинца и олова. Притиры из свинца, олова и других мягких материалов хорошо шаржируются абразивом, однако имеют повышенный износ, в несколько раз превышающий износ чугунных притиров. При доводке высокоточных отверстий небольших диаметров применяют разрезные притиры из мягкой стали.

К рабочей поверхности притиров предъявляют высокие требования по точности формы и шероховатости поверхности. Как правило, плоские притиры предварительно шлифуют, а затем прирабатывают по методу трех плоскостей, для чего в комплекте необходимо иметь три притира, которые попеременно прирабатывают друг с другом порошками убывающей зернистости, вплоть до микропорошка, который применяют на доводочной операции. Притиры для доводки отверстий должны иметь точность формы в продольном и поперечном сечениях в пределах 0,005 мм; биение притира на оправке не должно превышать 0,01 мм. Для восстановления точности изношенных притиров применяют контрпритиры — втулки.

Контроль плоскостности притиров осуществляют, в зависимости от требований к точности, лекальной линейкой на просвет, с помощью приборов типа индикатора и микрокатора или интерференционным методом с помощью стеклянных пластин. В процессе доводки следует постоянно, через некоторые промежутки времени контролировать форму рабочей поверхности притира, не допуская значительных отклонений от плоскостности.

Перспективными являются притиры, представляющие собой абразивные круги на керамической связке, для плоской доводки. Такие круги работают торцами, причем в процессе доводки происходит постепенное самозатачивание инструмента. Например, доводку торцов колец подшипников производят кругами 900×40×305 из карбида кремния зеленого зернистостью 6—8, твердостью М3—СМ1. Комплектом таких кругов-притиров обрабатывают до 150 000 колец, кратковременную правку кругов производят через одну-две смены. При доводке достигают шероховатости поверхности $Ra = 0{,}16 \div 0{,}32$ мкм, непараллельности и неплоскостности торцов колец в пределах 0,002—0,004 мм. Применение абразивных кругов в качестве доводочных притиров позволило увеличить производительность доводки на 20%, повысить культуру труда, исключить операции промывки и протирки колец.

Производительность и качество доводки

Припуск на доводку. Как правило, доводку выполняют после шлифования. Припуск при односторонней доводке $h = k\,(Rz + \Delta)$; при плоскопараллельной доводке, доводке поверхностей вращения припуск рассчитывают по формуле

$$h = k\,(2Rz + \Delta),$$

где $k = 1{,}2 \div 1{,}5$ — коэффициент запаса, учитывающий наличие на поверхности отдельных глубоких рисок, царапин и других дефектов; Rz — высота неровностей шлифованной поверхности; Δ — погрешность формы детали после шлифования.

В некоторых случаях припуск на доводку следует увеличивать для удаления дефектного слоя металла.

Таблица 8.23

Количество доводочных операций и припуски на доводку деталей

Требуемая точность, мкм	Требуемая шероховатость Ra, мкм	Количество операций	Припуск на доводку, мм
3,0—5,0	0,16	1	0,03—0,05
1,0—2,0	0,08	1 2	0,03—0,05 0,005—0,01
0,2—0,5	0,04	1 2 3	0,03—0,05 0,005—0,01 0,002—0,003
0,1—0,3	0,01—0,02	1 2 3 4	0,03—0,05 0,005—0,01 0,002—0,003 0,0005—0,001

Доводку производят в несколько последовательных операций, число которых зависит от требований к точности и шероховатости поверхности детали (табл. 3.23).

Для обеспечения стабильности процесса доводки рассеяние размеров партии деталей не должно превышать 0,2—0,3 величины припуска. Это достигается путем селекции деталей. На операциях прецизионной доводки сортировку деталей следует выполнять особенно тщательно.

Режим доводки. Основными факторами, определяющими режим доводки, являются давление на площадь контакта притир—деталь, скорость рабочего движения и время доводки. При обработке деталей из закаленных сталей оптимальные значения давления на предварительных операциях составляют 1—2 кгс/см^2, на окончательных операциях 0,5—1 кгс/см^2. При высокой скорости доводки (80—120 м/мин) и большом количестве одновременно обрабатываемых деталей давление может быть снижено до 0,5—0,7 кгс/см^2 на предварительных операциях и до 0,2—0,5 кгс/см^2 на окончательных операциях. При обработке деталей из мягких материалов (незакаленная сталь, цветные металлы и сплавы) рекомендуется уменьшать давление до 0,2—0,3 кгс/см^2. Доводку деталей из хрупких материалов следует производить при давлениях 0,05—0,2 кгс/см^2.

Цикл доводки можно осуществлять как с постоянным давлением, так и с изменением давления за время операции. В последнем случае вначале работают с бо́льшим давлением, обеспечивающим интенсивный съем материала, а в конце операции уменьшают давление для достижения необходимой шероховатости поверхности. При доводке шаржированными притирами, когда с течением времени происходит затупление абразивных зерен, следует постепенно повышать давление для поддержания производительности доводки.

Скорость рабочего движения на предварительных доводочных операциях равна 40—120 м/мин; окончательная доводка производится при скорости 15—30 м/мин, прецизионная доводка при скорости 5—10 м/мин.

С повышением давления и скорости рабочего движения интенсивность съема материала увеличивается, однако существуют некоторые предельные значения давлений и скоростей, при превышении которых происходит интенсивное измельчение абразивных частиц и их унос с поверхности притира, вследствие чего производительность доводки снижается.

В табл. 3.24 приведены примеры выполнения доводочных операций при обработке различных деталей.

Качество доведенной поверхности. Высота шероховатости обработанной поверхности зависит в основном от зернистости абразива и может быть определена по формуле

$$Rz \approx C_{Rz}\sqrt{d},$$

Примеры доводочных операций

Таблица 3.24

Обрабатываемые детали	Припуск, мм	Абразивный материал, зернистость	Режим			Точность формы доведенной детали, мм	Шероховатость доведенной поверхности *Ra*, мкм
			Давление, кгс/см²	Скорость, м/мин	Время, мин		
Плоскопараллельные концевые меры длины из инструментальной стали (*HRC* 62—65):							
первая операция	0,03—0,05	24АМ28	1,2—1,5	40—60	4—5	0,002—0,003	0,16—0,32
вторая »	0,01—0,015	24АМ7	1,3—1,5	15—20	2—3	0,001—0,0015	0,08
третья »	0,005—0,007	24АМ3	1,0—1,2	10—15	1,5—2	0,0005—0,001	0,04
четвертая »	0,001—0,0012	24АМ2, глинозем М2	0,8—1,0	7—10	2—3	0,0001—0,0005	0,01—0,02
Пластины из полупроводникового кремния:							
первая операция	0,02—0,025	24АМ10	0,08—0,1	40—50	2,5 (на одну пластину)	0,01—0,02	0,32
вторая »	0,01—0,015	24АМ7	0,08—0,1	40—50		0,01—0,15	0,16—0,32
третья »	0,005—0,01	24АМ5	0,08—0,1	40—50		0,005—0,01	0,08—0,16
Полублоки магнитных головок (пермаллой)	0,01—0,02	24АМ1	0,4—0,6	5—7	—	0,0003—0,0006	0,04—0,08
Детали топливной аппаратуры:							
первая операция	0,03—0,05	24АМ28	2—3	n=160 об/мин	—	0,005—0,01	0,32—0,63
вторая »	0,01—0,03	24АМ7	2—2,5	n=390 об/мин	—	0,001—0,004	0,16
третья »	0,003—0,01	24А М3—М1	0,8—1,2	n=700 об/мин	—	0,0005—0,001	0,04—0,08
Зубчатые колеса из закаленной стали 20ХНМ, 25ХГТ и др. (*HRC* 55—63)	—	24АМ40—М28	4—10 (в системе торможения)	170—200	—	—	0,16—0,32
Бронзовые диски диаметром 60—120 мм:							
первая операция	0,02—0,03	Окись хрома 40 мкм	0,2—0,3	20—30	5—7	—	0,32
вторая »	0,01—0,015	Окись хрома 7 мкм	0,1—0,15	10—15	2—3	—	0,08—0,16
третья »	0,003—0,005	Окись хрома 4 мкм	0,1—0,15	10—15	2—3	—	0,04—0,08

Таблица 3.25

Шероховатость доведенной поверхности при обработке закаленных сталей микропорошками различной зернистости

Зернистость микропорошка пасты	Шероховатость Ra, мкм	Зернистость микропорошка пасты	Шероховатость Ra, мкм	Зернистость микропорошка пасты	Шероховатость Ra, мкм
М40	0,32—0,63	М14	0,16	М5	0,08
М28	0,32	М10	0,08—0,16	М3	0,04—0,08
М20	0,16—0,32	М7	0,08—0,16	М1	0,02—0,04

где C_{Rz} — коэффициент, зависящий от обрабатываемого материала; для закаленной конструкционной стали $C_{Rz} = 0{,}15$; d — зернистость, мкм.

Некоторые данные о шероховатости поверхности при доводке деталей из закаленных сталей приведены в табл. 3.25.

Высота шероховатости является не единственным критерием качества поверхности с точки зрения эксплуатационных свойств деталей. Износостойкость поверхности, контактная жесткость и другие свойства во многом зависят от высоты микронеровностей и величины шага между ними.

На рис. 3.13 приведены кривые распределения величин шагов микронеровностей для поверхностей, обработанных различными микропорошками. С увеличением зернистости порошка среднее значение шага и рассеяние величин шагов увеличиваются. Таким образом, доводка более мелким абразивом уменьшает не только высоту микронеровностей, но и шаг между ними, что создает более однородный микрорельеф. Фактическая опорная поверхность после доводки значительно увеличивается по сравнению с опорной поверхностью после шлифования. Так, если при шлифовании при $Ra = 0{,}16$ мкм опорная поверхность от максимальных точек профиля 0,1 и 0,2 мкм составляет соответственно 9 и 28%, то после доводки при $Ra = 0{,}16$ мкм опорная поверхность между теми же точками составляет 35 и 78%.

При доводке отсутствуют какие-либо фазовые изменения в поверхностном слое металла, так как тепловыделение и, следовательно, температура поверхностного слоя в процессе обработки незначительны. Однако в случае разрушения граничного слоя смазки, разделяющего поверхности притира и детали, на доведенной поверхности могут наблюдаться прижоги, вызванные резким повышением температуры поверхностного слоя при трении без смазки. Доводка создает некоторый наклеп (упрочнение) в поверхностном слое металла. Степень наклепа достигает 20—30%, глубина упрочненного слоя не превышает 10 мкм, а наибольшее упрочнение наблюдается в слое глубиной до 2—3 мкм. В поверхностном слое металла после доводки образуются остаточные напряжения сжатия, величина которых составляет 20—40 кгс/см², а глубина напряженного слоя не превышает 7—10 мкм.

При доводке свободным абразивом происходит интенсивное шаржирование поверхностного слоя детали абразивными частицами. Интенсивность шаржирования зависит от твердости обрабатываемого материала, давления и времени доводки. Доводка закрепленным абразивом значительно уменьшает как интенсивность шаржиро-

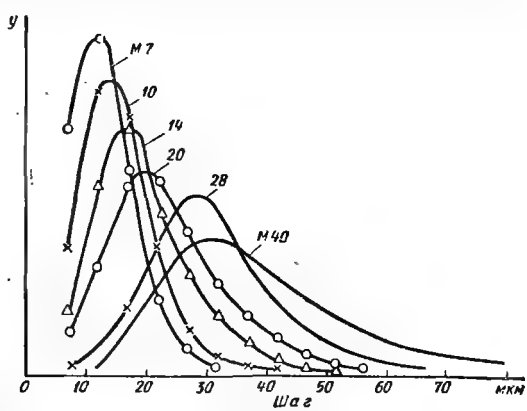


Рис. 3.13. Кривые распределения величин шагов микронеровностей для стекла К8

вания, так и размеры внедренных в металл абразивных частиц. Значительный эффект по уменьшению степени шаржирования дает ультразвуковая очистка деталей, хотя она и не удаляет частиц абразива, наиболее прочно закрепившихся в металле.

§ 3.4. Ленточное шлифование

Область применения и способы ленточного шлифования

Ленточное шлифование применяют на различных стадиях технологического процесса. При обдирочном шлифовании заготовок, например слябов, лентами удаляют дефектный поверхностный слой и снимают большие припуски (до 20 мм). Абразивные и алмазные ленты применяют для формообразования деталей при плоском, круглом и внутреннем, бесцентровом шлифовании, а также для обработки сложных фасонных поверхностей. Заключительные операции: снятие заусенцев, полирование, подготовку деталей под покрытия и обработку покрытий, а также заточку и доводку режущего инструмента производят лентами.

Такое многообразие операций ленточного шлифования обусловлено более широкими, по сравнению с шлифованием кругами, возможностями управления процессом резания путем изменения натяжения ленты и жесткости прижимного ролика и конструктивными, функциональными и эксплуатационными особенностями. Рабочая поверхность бесконечной ленты больше поверхности шлифовального круга; лента не нуждается в правке и балансировке; обработку производят с постоянной скоростью резания; закрепление зерен на поверхности ленты упругое. При одинаковой сложности систем управления кинематика станка для ленточного шлифования проще, чем для шлифования кругом. Лента безопасна при разрыве. Имеются широкие возможности агрегатирования и автоматизации процесса ленточного шлифования.

В зависимости от требований к точности детали и ее формы обработку лентой производят на свободной ветви (рис. 3.14, *а*) или с поджатием ленты к поверхности детали с помощью ролика (рис. 3.14, *б*), жесткого копира соответствующей формы (рис. 3.14, *в*) или упругого элемента (рис. 3.14, *г*). По последней схеме в основном полируют детали сложной формы; эта обработка сопровождается большой деформацией ленты. Обработку на свободной ветви ленты обычно применяют при выполнении операций с невысокими требованиями к геометрической точности поверхности или при съеме малых припусков. Шлифование с поджимным элементом применяют при изготовлении деталей как простой, так и сложной формы, имеющих большие и малые припуски, в том числе и неравномерные. Эта схема обеспечивает высокую точность обработки.

На рис. 3.15 представлены технологические операции ленточного шлифования: бесцентровое ленточное шлифование (рис. 3.15, *а*), шлифование или полиро-

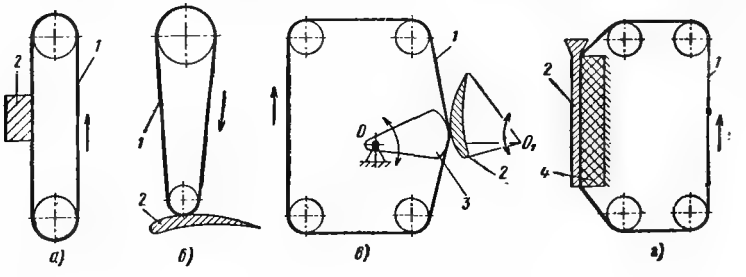


Рис. 3.14. Основные схемы шлифования лентой:

1 — лента; *2* — деталь; *3* — копир; *4* — упругий элемент

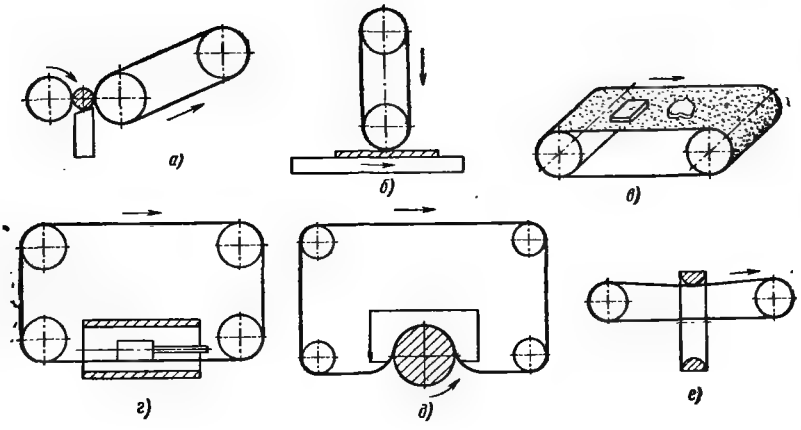


Рис. 3.15. Технологические операции ленточного шлифования

вание листа широкой лентой (рис. 3.15, *б*), отделочное шлифование мелких деталей (рис. 3.15, *в*), шлифование внутренней поверхности трубы лентой, продетой в трубу и склеенной в кольцо (рис. 3.15, *г*), шлифование тела вращения лентой, прижатой жестким или упругим контртелом (рис. 3.15, *д*), шлифование внутренней поверхности кольца свободной ветвью ленты (рис. 3.15, *е*).

Сложные фасонные поверхности обрабатывают широкой лентой одновременно по всей поверхности или узкой лентой построчечно. Строчечная обработка имеет свои разновидности: обработка продольной строкой, поперечной строкой, с проходом в двух направлениях и с движением площадки контакта по синусоиде. Последняя схема обеспечивает наилучшее взаимное расположение следов обработки. Обработку сложных фасонных поверхностей выполняют поджимными элементами соответствующей формы или при сочетании этих элементов с системами копирования. Подачу абразивной ленты на врезание можно осуществлять жестко на заданную величину или бесступенчато. Наиболее благоприятной является бесступенчатая подача, так как она позволяет снимать неравномерные припуски при постоянных силах и температурах резания, что положительно сказывается на состоянии поверхностного слоя детали и стойкости копира.

В некоторых случаях, например при шлифовании кромок, прижимному элементу сообщают колебательное движение в направлении перпендикулярно нормали к обрабатываемой поверхности с амплитудой, достаточной для отрыва ленты от детали. При этом выравнивается натяжение ветвей ленты, движение ленты становится более плавным, без вспучиваний и волн.

Колебательное движение ленты в ее плоскости в направлении, перпендикулярном к вектору скорости ленты, способствует срезанию гребешков микронеровностей на поверхности детали и улучшению качества поверхностного слоя. При обработке деталей различной формы вместо бесконечных лент иногда применяют ленточные барабаны, которые называют также лепестковыми кругами. Они собраны из отдельных кусков ленты, радиально расположенных и закрепленных одним концом на барабане. При вращении барабана такие ленты-лепестки способны удалять материал с фасонной поверхности детали. Ленточные барабаны обычно применяют для полирования и снятия заусенцев.

Недостатком процесса обработки деталей абразивной лентой является сравнительно низкая стойкость ее, поэтому особое внимание следует уделять выбору условий обработки деталей лентой. Так, например, использование бесступенчатой подачи ленты на врезание повышает ее стойкость в 2 раза и более, улучшает качество обработки.

Абразивные ленты используют при обработке различных материалов: сталей (легированных и жаропрочных), цветных металлов (алюминия, меди, латуни,

бронзы), титановых и жаропрочных сплавов. Бесконечные алмазные и эльборовые ленты используют при полировании беговых дорожек колец подшипников, шеек коленчатых валов и некоторых деталей приборов. Удовлетворительные результаты получены при обработке алмазными бесконечными лентами сложных фасонных поверхностей.

Виды, размеры и характеристика ленточного шлифовального инструмента

Состав шлифовальной шкурки, применяемой при изготовлении бесконечных абразивных лент, показан на рис. 3.16.

В ГОСТ 12439—66 предусмотрены следующие типы водостойких и неводостойких абразивных лент: ЛСНТ — лента склеенная (бесконечная) неводостойкая на тканевой основе; ЛСНБ — лента склеенная, неводостойкая на бумажной основе; ЛСВТ — лента склеенная, водостойкая на тканевой основе; ЛНТ — лента неводостойкая на тканевой основе; ЛНБ — лента неводостойкая на бумажной основе; ЛВТ — лента водостойкая на тканевой основе.

Длина лент установлена в 500, 560, 630, 750. . . 3000 мм, ширина 8, 10, 12, 15, 20. . . 900 мм. Отклонение длины допускается от ±5 мм на нижнем пределе до ±20 мм на верхнем пределе, отклонение ширины соответственно от ±1 до ±10 мм.

Абразивные ленты изготовляют из шлифовальной шкурки и в зависимости от вида последней применяют для шлифования без охлаждения и с применением СОЖ. Для шлифования без охлаждения или с масляным, керосиновым и уайт-спиритовым охлаждением ГОСТ 6456—75 установлены следующие размеры шлифовальной шкурки на бумажной основе: ширина 720 мм, длина 50 м. Размеры шлифовальной шкурки на тканевой основе по ГОСТ 5009—75 составляют: ширина 760 мм, длина 50 м. Для тканей, применяющихся для шлифования без охлаждения, существуют следующие обозначения: СЛ — саржа легкая; ОСЛ — саржа легкая отделанная; СС — саржа средняя; ОСС — саржа средняя отделанная; ОСУ — саржа утяжеленная отделанная; СУ — саржа утяжеленная; ПД — полудвунитка.

Для шлифования с водяным или керосиновым охлаждением применяют водостойкую шкурку на бумажной основе размерами 230×130; 240×310 мм (ГОСТ 10054—75). Размеры водостойкой шлифовальной шкурки на тканевой основе по ГОСТ 13344—67 приведены в табл. 3.26.

Водостойкую шлифовальную шкурку изготовляют двух типов: Л — для ленточного шлифования, Р — для ручной обработки.

По ГОСТ 13344—67 прочность и относительное удлинение воздушно-сухой шлифовальной шкурки в зависимости от вида ткани-основы должны соответствовать нормам, указанным в табл. 3.27.

Тканевая основа шкурки покрыта аппретом, слой которого заполняет поры ткани. Это увеличивает прочность ткани на разрыв, повышает прочность сцепления нитей и жесткость шкурки, уменьшает относительное удлинение. Аппретом неводостойких лент на мездровом клее является состав, в который входят каолин, тальк, канифоль, мучные отходы и силикат. Для водостойких лент применяют латексный аппрет на основе латекса СВХ-1 или СКС-30, ламповую сажу, глицерин. Аппретом эльборовых лент является фенолформальдегидная смола.

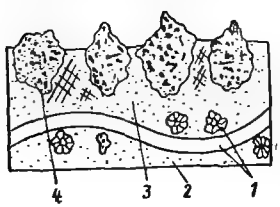


Рис. 3.16. Строение абразивной шкурки:

1 — тканевая основа; 2 — аппрета; 3 — связка; 4 — абразивные зерна

В качестве клеящего материала используют мездровый клей, обладающий при концентрации 17,75% и температуре 40° С вязкостью не ниже 4° по Энглеру. Для водостойких лент применяют клей на основе фенолфурфурольных формальдегидных смол, гифталевый лак, масляный лак ЯК-1, пентафталевый лак ПФШ-4, лак ПФТ-4. Широко распространенный лак ЯК-1, вязкость которого по вискозиметру ВЗ-4 составляет 350—400 с, состоит из 48% янтарной смолы, 24% тунгового масла, 24% уайт-спирита и 4% сиккатива.

Таблица 3.26

Размеры шлифовальной шкурки (мм)

Тип шкурки	Ширина шлифовальной шкурки	Длина шлифовальной шкурки	Тип шкурки	Ширина шлифовальной шкурки	Длина шлифовальной шкурки
Л, Р	600 ±50 760 ±50	30 ±0,3	Л	820 ±50 1250 ±50	40 ±0,3

Таблица 3.27

Сопротивление разрыву и удлинение шлифовальных шкурок

Тип шкурки	Ткань основы	Сопротивление разрыву, кг (не менее), в направлении		Удлинение, %, не более
		продольном	поперечном	
Л повышенной прочности	Специальная упрочненная	180	90	9
Л обычная	Саржа легкая (СЛ) Саржа средняя (СС) Саржа утяжеленная (СУ) Полудвунитка (ПД)	75 85 130 100	35 35 40 60	8 8 9 10
Р	Саржа легкая (СЛ) Саржа средняя (СС) Саржа утяжеленная (СУ) Полудвунитка (ПД)	75 75 75 75	25 25 25 25	—

Зерна на поверхности шлифовальной шкурки закрепляются электростатическим или механическим методами. Электростатический метод нанесения зерен на смазанную клеем основу позволяет получать шлифовальные шкурки с ориентированными зернами, что положительно сказывается на работе абразивных лент, изготовленных из такой шкурки.

Электростатическим способом изготовляют также двухслойную шлифовальную шкурку, в которой второй (верхний) слой абразивных зерен имеет зернистость на один-два номера меньше зернистости первого слоя. Двухслойную шлифовальную шкурку успешно применяют при обработке титановых и жаропрочных сплавов.

В табл. 3.28 приведены основные физико-механические свойства шлифовальных шкурок на различных основах.

Таблица 3.28

Физико-механические свойства шлифовальных шкурок

Основа	Толщина шкурки, мм	Удлинение, %	Разрывная сила, кгс, не менее	Количество, г/см²	
				зерен	клея
Саржа:					
СУ24А40 утяжеленная	1,4—1,5	6,5	150	626	200
СУ24А40 утяжеленная двухслойная	1,9—2,2	5,5	167	1100	340
СС24А40 средняя	1,2—1,3	6,5	140	435	168
СЛ63С25 легкая	1,0—1,1	6,5	130	435	168
Полудвунитка ПД63С40	1,35—1,4	6,5	132	625	200
Стеклосетка СС63С40	1,35	2,3	272	625	200
Стеклоткань СТ63С40	1,35	2,5	136	625	200

Таблица 3.29

Шероховатость обработанной поверхности в зависимости от марки связки ленты

Марка связки	Шероховатость *Ra*, мкм		Марка связки	Шероховатость *Ra*, мкм	
	исходная	достигаемая		исходная	достигаемая
Р1 Р4	0,08—0,16 0,16—0,32	0,02—0,04 0,04—0,08	Р9 Р14	0,63—1,25 1,25—0,63	0,16—0,32 0,32—0,63

Шлифовальные шкурки поставляют в бобинах и пакетах. Для получения бесконечных абразивных лент шкурку в специальном приспособлении разрезают на полосы необходимой ширины и склеивают в кольцо. Конфигурация шва может быть местной (косой или шевронный) и на всю длину ленты (косой) [51].

Перспективным является применение бесшовных лент из рукавной ткани. Созданы абразивные ленты в форме листа Мёбеуса [20] с двусторонним покрытием зернами. При склеивании таких лент концы поворачивают относительно друг друга на 180°. Эта лента работает обеими сторонами, так как в процессе шлифования они непрерывно переходят друг в друга.

Алмазные ленты изготовляют на каучукосодержащих связках, наносимых на высокопрочную лавсановую ткань. По жесткости связки делят на три группы: эластичные (Р1, Р4), полужесткие (Р9), жесткие (Р14). Каждой марке связки соответствует определенный класс шероховатости обработанной поверхности (табл. 3.29).

Алмазная бесконечная бесшовная шлифовальная лента АЛШБ состоит из алмазного слоя, безалмазного подслоя и несущей основы из лавсановой ткани. Для придания необходимой гибкости лентам, изготовленным на полужестких и жестких связках, в алмазоносном слое сделаны специальные канавки.

Размеры алмазных бесшовных бесконечных лент: длина по периметру 1900—1940 мм; ширина 20 мм; толщина алмазоносного слоя с учетом рифлений 1,0 мм; общая толщина ленты 1,9 ± 0,2 мм; содержание алмазов при 100%-ной концентрации — 114 каратов.

Кроме гибких полировальных инструментов, оснащенных синтетическими алмазами, выпускают водостойкую полировальную шкурку из эльбора на шифонной и капроновой основах.

Перспективной является разработка алмазных абразивных лент на металлической основе.

Режимы работы и качество деталей при ленточном шлифовании

Ленточное шлифование по своим характеристикам занимает промежуточное положение между шлифованием кругами и свободным абразивом (табл. 3.30). Это объясняется упругим характером закрепления зерен на рабочей поверхности ленты.

Ленточное шлифование имеет иной баланс теплоты, чем шлифование кругами. Температура поверхности детали при ленточном шлифовании ниже, чем при шлифовании кругами, но выше, чем при шлифовании свободным абразивом. Меньшие, чем при обработке кругами, силы и температуры приводят при ленточном шлифовании к меньшему изменению исходных свойств материала в поверхностном слое. Обработка абразивными лентами приводит к формированию в поверхностных слоях деталей сжимающих остаточных напряжений до глубины 30—40 мкм и более. Эпюра перехода сжимающих напряжений в растягивающие плавная. Усталостная прочность образцов из титановых и жаропрочных сплавов после точения с последующей обработкой лентами 63С40/25 и АСМ40/28 повышается на 8—12%.

Диспергирование поверхностного слоя при ленточном шлифовании может сопровождаться увеличением микротвердости до 15% и выше. При этом в неко-

Таблица 3.30

Сравнение ленточного шлифования со шлифованием кругом и свободным абразивом

Вид шлифования	Рабочая скорость, м/с	Контактная температура, °С	Класс точности		Шероховатость Ra, мкм		Остаточные напряжения
			фактический	достигаемый	фактическая	достигаемая	
Кругом	10—100	700—1200	2	1	0,63	0,08	Растяжения
Лентой	10—30	400—800	3, 4	1, 2	0,63	0,04	Сжатия
Свободным абразивом	2—5	200—300	2, 3	1	0,08	0,01	»

торых случаях отпадает необходимость в последующем упрочнении поверхностного слоя ответственных деталей обдувом шариками.

Рекомендации по выбору зернистости, скорости резания, удельного давления ленты, смазочно-охлаждающей жидкости в зависимости от заданной шероховатости поверхности детали для различных групп материалов при ленточном шлифовании и полировании приведены в табл. 3.31.

Алюминиевые и медные сплавы следует шлифовать карбидокремниевыми лентами с охлаждением маслом или эмульсией при скорости резания 25—35 м/с и удельном давлении ленты 2 кгс/см². Титановые сплавы рекомендуется шлифовать при скоростях не более 18 м/с с удельным давлением до 3 кгс/см². При малых припусках для титановых сплавов допускается повышение скорости резания до 25 м/с [83].

Шероховатость поверхности при обработке на свободной ветви снижается примерно на один класс по сравнению с обработкой лентой с поджимным элементом. Полирование лентами следует производить при бо́льшей скорости и меньшем удельном давлении, чем шлифование. Выход ленты из строя может произойти в результате ее обрыва, износа или потери режущей способности при засаливании. Пропитка основы лент маслом повышает эластичность ленты и увеличивает период стойкости, а пропитка клеем БФ4 снижает относительное удлинение ленты, что уменьшает осыпание абразива. Пропитка клеем также увеличивает прочность ленты на разрыв на 15—20%.

Очистку рабочей поверхности лент от налипающего металла производят либо с помощью специального очистителя при трении ленты о кусок пористого материала (поролона, пенопласта), либо в результате встряхивания ленты при ее поперечных колебаниях. Другим методом очистки лент является реверсирование направления ее движения, при этом период стойкости лент повышается в 1,5—2 раза.

Существенное увеличение стойкости ленты наблюдается также при изменении характера подачи ленты с жесткого на бесступенчатый с помощью специального упругого звена. Стойкость ленты зависит от разности натяжений ветвей ленты и увеличивается при уменьшении последней. Как уже отмечалось, поперечные колебания прижимного элемента способствуют уравниванию натяжений.

Различие натяжений ветвей ленты оказывает также влияние на силы шлифования, которые изменяются на 15—20% при перемене направления подачи. Разница в силах уменьшается до 10—12%, если натяжной элемент располагать на ведомой ветви ленты.

Зависимости сил от глубины шлифования t (мм), продольной подачи s (мм/об) и ширины шлифования b (мм) имеют вид

$$P_z = C_z t^{x_z} s^{y_z} b^{q_z}; \qquad (3.3)$$

$$P_y = C_y t^{x_y} s^{y_y} b^{q_y}.$$

Таблица 3.31

Выбор технологических параметров, обеспечивающих заданную шероховатость при шлифовании (Ra = 1,25 мкм) и полировании (Ra = 0,32 мкм) абразивными лентами

Обрабатываемый материал	Зернистость ленты		Скорость резания, м/с		Удельное давление, кгс/см²		Охлаждающая среда
	при шлифовании	при полировании	при шлифовании	при полировании	при шлифовании	при полировании	
Сталь (*HRC* 60)	40—16	М28—М14	22—30	25—32	2—4	1,5—3	Водный раствор нитрида натрия, триэтаноламин, сульфофрезол, масляные эмульсии, масло
Чугун	40—16	М28—М14	20—25	25—30	2—4	1,5—3	Водные растворы соды, эмульсии
Медь и ее сплавы	40—25	М40—М28	25—32	30—38	До 2	До 0,8	Масляные эмульсии, масло, сжатый воздух
Алюминий и его сплавы	40—25	М40—М28	25—35	30—40	До 2	До 1	Масляные эмульсии, масло, сжатый воздух
Титан и его сплавы	40—14	М28—М14	12—18	16—22	1,5—2,5	0,3—1,0	Водные растворы нитрида натрия, фосфата калия, гексаметафосфата натрия и триэтаноламина, сульфофрезол, водные растворы хлористого калия и йода
Жаропрочные сплавы	40—25	М40—М28	22—25	22—28	1,5—3	0,8—1,5	Водные растворы соды, масляные эмульсии, сульфофрезол, масло

Таблица 3.32

Значения показателей степеней в формулах (3.3)

Обрабатываемый материал	x_z	x_y	y_z	y_y	q_z	q_y
У7А	0,86	0,90	0,45	0,45	0,92	0,90
12Х18Н10	0,84	0,87	0,45	0,45	0,96	0,90
ХН77ТЮР	0,82	0,84	0,41	0,43	0,97	0,95
Латунь	0,88	0,92	0,35	0,35	0,98	0,97

Таблица 3.33

Значение сил P_z и P_y (кгс) при шлифовании различных материалов абразивной лентой

Глубина шлифования t, мм	Продольная подача s, мм/об	Латунь		У7А		12Х18Н10Т		ХН77ТЮР	
		P_z	P_y	P_z	P_y	P_z	P_y	P_z	P_y
0,02	2,5	1,7	2,6	2,4	4,7	3,0	6,2	5,6	11,5
0,03		2,5	3,8	3,7	7,2	4,0	8,0	7,5	15,0
0,04		3,8	5,7	4,2	8,4	5,4	11,8	9,0	19,0
0,05		4,2	6,0	5,3	8,6	6,6	14,0	11,6	24,5
0,02	10	2,4	3,5	4,5	8,5	6,0	11	9,5	18
0,03		3,8	5,2	6,4	13,0	7,5	14	12	24
0,04		4,5	7,0	7,5	15,0	10,5	20	16	31
0,05		5,8	8,3	10,0	20,0	13,6	25	21	42

Значения показателей степеней для различных материалов приведены в табл. 3.32.

Значения сил при шлифовании различных материалов абразивной лентой СУ24А40 со скоростью 24 м/с приведены в табл. 3.33.

С увеличением скорости ленты силы P_y и P_z уменьшаются, особенно при обработке мягких материалов. При ленточном шлифовании меди, латуни, дюралюминия увеличение скорости ленты с 10 до 35 м/с вызывает уменьшение сил P_y и P_z на 25—30%, в то время как при шлифовании сплавов ХН77ТЮР, ЖС6К в тех же условиях эти силы уменьшаются только на 10—15%.

Влияние начального натяжения ленты на силы шлифования также зависит от свойств обрабатываемого материала. Увеличение натяжения ленты незначительно увеличивает силы шлифования при обработке мягких материалов и значительно — при обработке твердых материалов (табл. 3.34).

Таблица 3.34

Зависимость сил P_y и P_z (кгс) от начального натяжения ленты

Натяжение ленты, кгс/см	Медь		У7А		ХН77ТЮР		ЖС6К	
	P_z	P_y	P_z	P_y	P_z	P_y	P_z	P_y
2	3	4,5	2,5	5	4,5	9	2	5
4	3,5	5,3	4,4	8,7	5,5	11	6	12
6	3,5	5,3	4,8	9	7,5	15	8	15
8	3,5	5,3	4,8	9,5	9	18	10	22
10	3,5	5,3	4,8	9,5	9,5	18,5	10,5	24
12	3,5	5,3	4,8	9,5	9,5	18,5	11	26

Таблица 3.35

Параметры ленточного шлифования титановых сплавов

Характеристика ленты	Обрабатываемый материал	Производительность до износа, г	Стойкость ленты, мин	Минутная производительность, г/мин	Износ ленты		Припуск на сторону, мм	Удлинение ленты, %
					Расход абразива, г	Уменьшение толщины, мм		
ЧЯК1 + 2ФМ3, 63С40 + 25	ВТ3-1	11,5	28	0,4	19	0,72	0,25	1,6
ЯК1 + 2ФМ3, 44А40		4,8	14	0,34	11	0,5	—	2
ЯК1 + 2ФМ3, 33А40		8,7	27	0,32	17	0,7	—	3
ЯК1 + 2ФМ3, 63С25		3,0	7	0,43	6	0,5	—	1,5
ЯК1 + 2ФМ3, 63С40 + 40		3,4	14	0,24	18	0,6	—	2
ЧЯК1 + 2ФМ3, 63С40 + 25	ВТ5-1	16,4	33,5	0,5	20	0,8	0,26	2
ЯК1 + 2ФМ3, 44А40		10,2	22	0,45	10	0,44	—	1
ЯК1 + 2ФМ3, 33А40		8,0	17,0	0,47	7,8	0,5	—	1,3
ЯК1 + 2ФМ3, 63С25		4,4	11,5	0,38	6	0,46	—	1,5
ЯК1 + 2ФМ3, 63С40 + 40		8,0	25	0,32	30,5	1,11	—	1,2

Ленточное шлифование широко применяют при обработке деталей сложной формы из титановых сплавов. Производительность обработки, стойкость и износ ленты, ее относительное удлинение и величина снятого припуска при шлифовании фрезерованных деталей из титановых сплавов различными методами приведены в табл. 3.35.

На окончательных операциях применяют шлифование и полирование абразивными и алмазными лентами. Разработаны алмазные ленты на эластичных каучукосодержащих связках Р1—Р14. Величины шероховатости поверхностей деталей, обработанных такими лентами, приведены в табл. 3.29. Зависимость шероховатости поверхности от времени обработки показана в табл. 3.36. На начальном этапе обработки происходит быстрое уменьшение шероховатости, скорость съема постепенно уменьшается. Такие зависимости необходимы для определения экономически оправданных режимов и продолжительности алмазного ленточного шлифования.

На рис. 3.17 показано влияние состава смазочно-охлаждающей жидкости на процесс обработки лентами на связках Р1—Р14. Наилучшие результаты до-

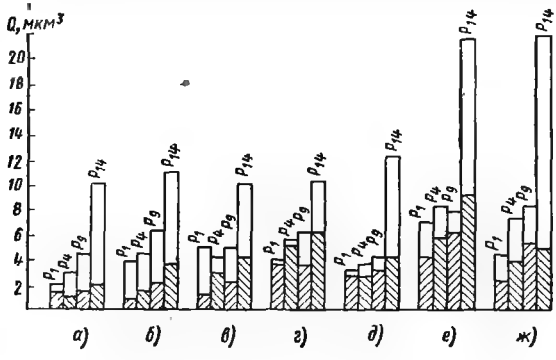


Рис. 3.17. Зависимость производительности алмазного ленточного шлифования от вида СОЖ:

а — эмульсия; *б* — масло машинное; *в* — керосин; *г* — 50% керосина, 50% масла машинного; *д* — 75% керосина, 25% масла машинного; *е* — 75% керосина, 24% масла машинного, 1% олеиновой кислоты; *ж* — 74% керосина, 25% масла машинного, 1% олеиновой кислоты; со штриховкой — съем, металла за 30 с; без штриховки — за 300 с

Таблица 3.36

Зависимость шероховатости *Ra* обработанной поверхности от вида связки алмазных лент и времени обработки

Связка	Исходная шероховатость, мкм	Шероховатость, мкм, достигаемая за время обработки		Связка	Исходная шероховатость, мкм	Шероховатость, мкм, достигаемая за время обработки	
		30 с	300 с			30 с	300 с
P1	5,0 1,6 1,25 0,63 0,32	2,0 1,25 0,8 0,4 0,2	1,0 0,8 0,63 0,32 0,125	P9	5,0 2,0 1,25 0,63 0,32	1,25 0,63 0,5 0,25 0,063	0,63 0,4 0,4 0,125 0,125
P4	5,0 2,0 1,0 0,63 0,4	1,6 0,8 0,5 0,32 0,125	0,63 0,5 0,4 0,16 0,063	P14	5,0 2,0 1,0 0,32	1,0 0,5 0,63 0,16	0,32 0,20 0,20 0,16

Таблица 3.37

Шероховатость поверхности цилиндрических деталей при шлифовании лентой

Характеристика	Съем металла на диаметр, мкм	Шероховатость *Ra*, мкм		Характеристика	Съем металла на диаметр, мкм	Шероховатость *Ra*, мкм	
		исходная	достигаемая			исходная	достигаемая
АСО80/63 P1	3	0,5	0,4	АСМ20/14 P9	3	0,63	0,25
АСО80/63 P4	12	0,5	0,32	АСМ40/28 P9	14	0,8	0,20
АСО80/63 P9	17	0,63	0,20	КО80/63 P1	3	0,5	0,25
АСО70/63 P14	19	0,63	0,25	КО80/63 P9	21	0,5	0,4
АСМ20/14 P1	2	0,63	0,5	КО80/63 P14	35	0,63	0,5

Таблица 3.38

Обрабатываемый материал	АСО80/63P9		АСМ20/14P9		АСМ20/14P9	
	Съем, мкм	*Ra*	Съем, мкм	*Ra*	Съем, мкм	*Ra*
Сталь 45, *HRC* 48—52	60	0,125	10	0,063—0,04	0,07—0,12	0,025—0,016
Твердый сплав ВК8	35	0,10	5	0,04—0,025	0,04—0,08	0,016—0,01
Латунь ЛС-59	195	0,63	24	0,08—0,063	1—0,12	0,025—0,02
Красная медь	200	0,63	30	0,16—0,08	1—0,12	0,04—0,02
Алюминий АК-6	410	0,4	45	0,063—0,05	0,07—0,1	0,02—0,016
Титан ВТ-9	180	0,5	20	0,08—0,063	0,09—0,12	0,025—0,02

стигнуты при применении смеси: 75% керосина, 24% машинного масла и 1% олеиновой кислоты.

Шлифование бесконечными алмазными лентами (свободной ветвью) применяют при окончательной обработке цилиндрических поверхностей (шейки коленчатых и распределительных валов, пальцы, поршни). Шлифование свободной ветвью, не исправляя погрешностей формы, уменьшает шероховатость поверхности (табл. 3.37).

Приведенные в табл. 3.37 значения получены при скорости ленты 15 м/с, скорости вращения детали 7,5 м/мин, продольной подаче детали 0,3 м/мин, машинном времени 5 мин, удельном давлении 2,85 кгс/см^2.

Наложение колебательного движения в плоскости ленты перпендикулярно направлению ее движения уменьшает шероховатость Ra обработанной поверхности в 2—4 раза. Шероховатость поверхности Ra^*, обработанной с колебаниями можно выразить через шероховатость поверхности Ra, обработанной на тех же режимах без колебаний в виде

$$Ra^* = \frac{1}{\left(1 + \frac{2L}{\pi s}\frac{a\nu}{v}\right)^{2/3}} Ra, \qquad (3.4)$$

где L — длина реза одним зерном, мм (при обработке с поджимным режимом $L = \sqrt{tD}$); s — ширина канавки, прорезаемой зерном на поверхности детали, мм; a — амплитуда колебаний, мм; ν — частота колебаний, 1/с; v — скорость ленты, м/с.

Зависимость шероховатости поверхности Ra от обрабатываемого материала при алмазном шлифовании свободной ветвью ленты показана в табл. 3.38.

Глава 4

НЕКОТОРЫЕ СПЕЦИАЛЬНЫЕ ВИДЫ АБРАЗИВНОЙ И АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ

§ 4.1. Электролитическое абразивное и алмазное шлифование

Физико-химические процессы, происходящие при электролитическом шлифовании. Электролитическое шлифование применяют для повышения производительности, качества и геометрической точности обрабатываемых деталей из твердых, магнитных, жаропрочных сплавов и других материалов. Метод основан на сочетании электрохимического анодного растворения металла с механическим режущим действием абразивных или алмазных зерен. Инструментом при электролитической алмазной и абразивной обработке является токопроводящий алмазный или абразивный круг на металлической связке.

В цепи источника постоянного тока круг подключают как катод, а обрабатываемую деталь — как анод. Анодное растворение детали достигается применением специального электролита. При электрохимическом шлифовании твердых сплавов в качестве электролита применяют нитрито-нитратный электролит.

В процессе электролиза нитрито-нитратного электролита на аноде выделяется двуокись азота. Продукты анодного растворения выносятся абразивными зернами в поток электролита,уходящего из межэлектродного зазора. При этом зерна снимают одновременно пассивирующую пленку и прилегающий к ней слой металла. Возможность электрической эрозии за счет искрения исключена вследствие малого напряжения источника питания (6—14 В).

Характерная для электролитической алмазной и абразивной обработки высокая производительность объясняется большой плотностью тока, достигающей при малом электродном зазоре 80—100 А/см^2.

Износ алмазного и абразивного кругов при электролитической обработке по сравнению с износом их при обычном шлифовании в 2—10 раз меньше, шероховатость обработанной поверхности достигает $Ra = 0{,}020 \div 0{,}32$ мкм. Сокращается брак твердосплавного инструмента и деталей по прижогам и трещинам.

Технологические схемы разновидностей электролитического шлифования. К разновидностям электролитического шлифования относятся: электрохимическая обработка, электроалмазная, электроабразивная, электроалмазная обработка с наложением ультразвуковых колебаний и электролитическая абразивная правка кругов. Технологические схемы этих методов представлены на рис. 4 1.

Выбор электролита. При электроалмазной и электроабразивной обработке электролит необходимо выбирать в зависимости от характеристики обрабатываемого металла. Предпочтение отдается электролиту, обеспечивающему интенсивное анодное растворение обрабатываемого материала.

Электролиты, применяемые при электролитических методах шлифования, должны обеспечивать высокую скорость анодного растворения, быть достаточно стабильными, универсальными, антикоррозионными и дешевыми, не оказывать токсического действия и должны быть очищенными от продуктов съема. В практике электрохимического шлифования применяют различные по составу и концентрации электролиты. В качестве антикоррозионных присадок в состав электролита обычно добавляют раствор нитрита калия или натрия, кальцинированную соду и др. В качестве комплексообразователей используют фосфат натрия и сегнетовую соль. Применение фтористого натрия, хотя и повышающего произ-

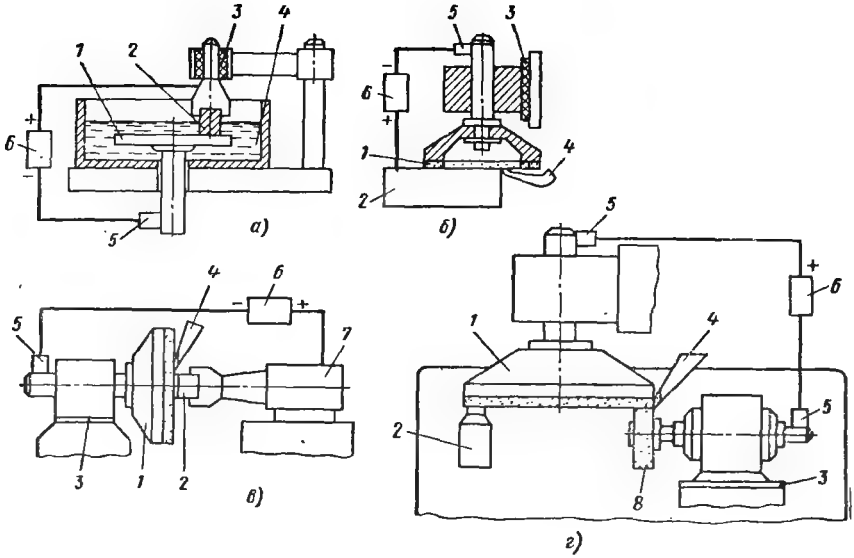


Рис. 4.1. Технологические схемы разновидностей электролитического шлифования:

а — электромеханическое шлифование; *б* — электролитическое шлифование; *в* — электролитическое шлифование с наложением ультразвуковых колебаний; *г* — совмещенная схема электроалмазного шлифования с электролитической правкой круга; *1* — шлифовальный инструмент; *2* — деталь; *3* — изолирующие детали; *4* — электролит (или место его подвода); *5* — токоподводящие устройства; *6* — выпрямитель; *7* — ультразвуковая головка; *8* — правящий круг

водительность, недопустимо в связи с его токсичностью. Электролиты, нашедшие наиболее широкое распространение в производстве, приведены ниже

Состав электролита	Обрабатываемый материал
9,6% $NaNO_3$, 0,3% $NaNO_2$, 0,1% $NaHCO_3$, 3% Na_3PO_4	ВК15, ВК20, ТТ7К12
15% $CuSO_4$	Все виды твердого сплава
5—10% $NaNO_3$ и 10% NaOH	ВК8, ВК15, ВК20
5—10% $NaNO_3$, 1% $NaNO_2$ и 0,1—0,3% $Cu(NO_3)_2$	ВК8, Т5К10, Т15К6
15% NaCl	ЮНДК35Т5, ЮН15ДК24
15% NaCl, 1,5% $NaNO_3$	30ХГСНА
1,5% $Na_2BO_3 \cdot 10\ H_2O$	12Х18Н9Т, 12Х18Н9, сталь 45
10% NaCl, 10% KBr	ВТ3, ВТ6, ВТ8, ВТ14, ОТ4, ОТ4-2
4,8% $NaCl_4$, 8% KNO_3 и 1,25% KBr	ВТ3-1, ВТ6
0,45% Na_2SO_4	ВТ14, ВТ8
15% NaCl, 10% KNO_3	12Х18Н9Т, Х15Н5Д2Т, Л-62, ЛС 59-
Остальное во всех составах — вода	

В процессе производства возникает необходимость одновременной обработки твердого сплава со сталью, в частности при заточке инструмента. В этом случае целесообразно в качестве электролита применение водного раствора KNO_3—NaCl, содержащего 5% KNO_3, 5% NaCl и 1% KNO_2. Добавка хлористого натрия в электролит способствует более интенсивному растворению стальной державки, что обеспечивает уменьшение засаливания алмазных кругов.

Очистка электролита. Эксплуатация электролита приводит к быстрому увеличению его щелочности и водородного показателя. В щелочном электролит

в результате вторичных реакций ионы металла M, соединяясь с OH^- ионами, переходят в плохо растворимую гидроокись

$$M^{++} + 2OH^- = M(OH)_2.$$

Повышение концентрации шлама по мере эксплуатации электролита затрудняет проникновение его в сравнительно малый межэлектродный зазор. Частицы шлама экранируют анодную поверхность и тем самым снижают производительность процесса.

Применяют ряд способов очистки электролита; осаждением (в поле гравитации и магнитном поле), фильтрацией, флотацией с добавлением коагуляторов и центрифугированием. В качестве коагулирующего вещества чаще всего используют полиакриламид.

Электрические параметры. Количество металла, снятого с детали, в значительной мере зависит от параметров электрических цепей: силы тока I, плотности тока j, напряжения U, сопротивления межэлектродного зазора R. Силу тока, проходящего через межэлектродный зазор, определяют по формуле

$$I = \frac{UF\varkappa}{\Delta},$$

где U — напряжение источника, В; F — площадь анода, см^2; $\varkappa$ — удельная электропроводность электролита, Ом$^{-1}$·см$^{-1}$ (табл. 4.1); Δ — межэлектродный зазор, см.

За величину межэлектродного зазора принимают среднее расстояние от связки круга до поверхности детали. Величина межэлектродного зазора в процессе шлифования изменяется и зависит от среднего размера зерен алмазов $\overline{x}$ (см), давления круга p (кгс/см^2), площади контакта детали с кругом F, свойств обрабатываемого металла и концентрации алмазов в круге K. При обработке твердых сплавов она может быть рассчитана по экспериментальной формуле

$$\Delta = 1{,}65p^{-0{,}23}x^{1{,}25}K^{0{,}015}F^{0{,}02}.$$

Таблица 4.1

Удельная электропроводность водных растворов солей при 18° С

Состав соли	Концентрация, %	Удельная электропроводность, Ом$^{-1}$·см$^{-1}$	Состав соли	Концентрация, %	Удельная электропроводность, Ом$^{-1}$·см$^{-1}$
$NaNO_3$	5 10	0,0436 0,0782	$CuSO_4$	5 10	0,0192 0,0320
KNO_3	5 10	0,0454 0,0839	NaOH	5 10	0,1971 0,3120
$NaNO_2$	0,5 1,0 3,0	0,0095 0,0162 0,0412	$KNaH_4C_4O_6$	10	0,0225
NaCl	5 10 15	0,0670 0,1218 0,1646	Na_2SO_4	5 10 15	0,0412 0,0699 0,0893
Na_2CO_3	10 15	0,0705 0,0796	H_3PO_4	10	0,057
			$Cu(NO_3)_2$	0,3 0,5 1,0	0,0021 0,0040 0,0077

Таблица 4.2

Зависимость плотности тока от давления и связки круга (при концентрации круга 100% и зернистости 80/63)

Давление круга, кгс/см²	Связка круга	Плотность тока, А/см²	Давление круга, кгс/см²	Связка круга	Плотность тока, А/см²
5 10 15	М15	30 40 45	5 10 15	ТМ2	28 32 80
5 10 15	МВ1	38 43 51	5 10 15	МО13	40 50 60

Плотность тока $j = I/F$ является сложной функцией многих параметров электролитического шлифования (давление круга, зернистости, скорости движения стола, удельной электропроводности и т. д.) и при оптимальных значениях колеблется в пределах 80—300 А/см².

С увеличением плотности тока съем материала при шлифовании возрастает. Так, например, съем твердого сплава почти для всех его марок увеличивается пропорционально $j^{0,55}$, а для магнитных сплавов пропорционально $j^{0,75}$. Однако чрезмерное увеличение плотности тока приводит к закипанию электролита.

В табл. 4.2 приводятся практически применяемые значения плотности тока в зависимости от давления и связки круга.

Необходимая величина силы тока в процессе шлифования может быть достигнута регулированием напряжения в цепи. Электролитическое шлифование ведут при напряжении 6—14 В. Выбор напряжения связан с рядом факторов: технологией электролитического шлифования, обрабатываемым материалом, характеристикой круга и механическими режимами обработки. Превышение напряжения приводит к переходу от электрохимического процесса к электроискровому.

Сопротивление межэлектродного зазора R зависит от характеристики круга, в частности его зернистости. Повышение зернистости круга приводит к увеличению сопротивления в зазоре и снижению интенсивности электрохимического растворения детали. Так, увеличение зернистости алмазов от АСВ50/40 до 100/80 при обработке сплава ВК6 со сталью 45 ($F = 210$ мм²) кругом АЧК 150×20×3 на связке МО13Э приводит к снижению удельного расхода алмазов в 3 раза, производительности и стоимости обработки соответственно в 1,2 и 2,8 раза. Для шлифования менее твердых металлов необходимо применять круги с большими размерами зерен. Применение кругов с малой зернистостью приводит в этом случае к искровой эрозии шлифующего инструмента. Число зерен в рабочем слое круга должно быть достаточным для механического съема прианодной пленки и обрабатываемого металла. Поскольку алмазные зерна на рабочей поверхности расположены по высоте случайно, то в процессе снятия пленки и прилегающего слоя металла участвуют лишь зерна, выступающие из круга. Число зерен, участвующих в резании и удалении пленки, увеличивается с увеличением концентрации алмазов, поэтому при повышении концентрации повышается производительность процесса. Хорошо показали себя алмазные круги, изготовленные гальваническим способом, поскольку вылет зерен в них более равномерный и больше число режущих зерен. Уменьшение концентрации алмазов повышает электропроводность круга, а вместе с тем и плотность тока. Это приводит к более интенсивному съему металла за счет электрохимического растворения.

С изменением концентрации зерен в круге изменяется количественное соотношение между механическим и электрохимическим съемами металла. Для электролитического шлифования оптимальной можно считать 100%-ную концентрацию алмазов в круге, обеспечивающую наиболее благоприятное сочетание анодного растворения и механического съема металла алмазными зернами.

Общее сопротивление круга на алюминиевой основе в условиях электролитического шлифования может быть снижено путем омеднения рабочей поверхности круга. Омеднение круга можно осуществить в процессе электрохимического шлифования при добавке в электролит 0,3—0,5% азотнокислой меди. Омеднение рабочего слоя алюминиевой связки позволяет снизить сопротивление круга на 20—30%. Сочетание высокой режущей способности с хорошей электропроводностью круга приводит в этом случае к значительному повышению съема металла.

Металлические связки, как правило, малопористы, в связи с чем подача электролита через связку алмазного слоя весьма сложна.

Режимы, производительность и технологические показатели процессов электролитического шлифования. Глубины шлифования, допускаемые по искрению, в зависимости от скорости движения стола станка и характеристики круга приведены в табл. 4.3. Рекомендации по выбору параметров обработки и характеристики кругов при электролитических методах шлифования деталей и инструмента приведены в табл. 4.4.

Сравнительная новизна электролитического абразивного и алмазного шлифования не позволяет дать полных данных для расчета сил резания. Некоторые значения тангенциальной P_z и нормальной P_y сил в зависимости от физико-механических свойств обрабатываемых материалов, параметров шлифования, характеристики круга и вида обработки приведены в табл. 4.5.

На основании экспериментальных и аналитических исследований электроалмазного шлифования магнитного сплава ЮНДК35Т5 торцом круга получены формулы

$$P_y = 157t^{1,1}v^{-0,65}v_1^{0,57}U^{-0,4};$$

$$P_z = 15t^{1,0}v^{-0,8}v_1^{0,58}U^{-0,35}.$$

При электролитической обработке силы резания в 2—3 раза меньше, чем при обычном шлифовании, соответственно и меньше потребная для снятия металла мощность. Уменьшение мощности при электрохимических методах обработки объясняется анодным растворением металла. Мощность резания с повышением напряжения тока в цепи уменьшается (рис. 4.2). На мощность резания при электролитических методах обработки, так же как и при обычных методах, существенно влияет связка круга (рис. 4.3).

Высокая производительность электролитических методов обработки обеспечивается комбинированным способом удаления металла за счет анодного растворения и механического съема его алмазными или абразивными зернами. Анодное растворение η в значительной мере зависит от параметров шлифования (рис. 4.4). Увеличение механических режимов приводит к снижению анодного растворения. Анодное растворение при обработке твердого сплава меньше, чем магнитное. Это объясняется тем, что при обработке твердых сплавов анодному растворению в основном подвергается кобальтовая связка, содержание которой в твердых сплавах незначительно, в то время как при обработке магнитных сплавов анодному растворению подвергаются все компоненты.

В производственных условиях инженер-технолог в зависимости от требований к качеству обрабатываемой детали может выбрать такие параметры шлифования, при которых съем металла будет происходить преимущественно за счет анодного растворения. Так, при электролитическом абразивном шлифовании жаропрочных сплавов преобладает электрохимическое растворение. Объем снимаемого металла при плоском электроабразивном шлифовании подсчитывают по формуле

$$V = \eta_1 I \frac{Cl}{\gamma \cdot 30L},$$

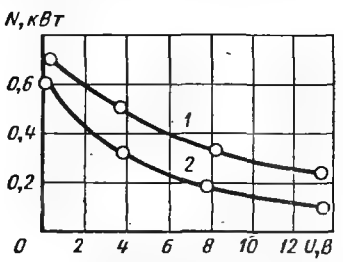


Рис. 4.2. Зависимость мощности резания N от напряжения U в зазоре (p = 10 кгс/см²):

1 — сплав ВК8; 2 — сплав ЮНДК35Т5

Таблица 4.3

Предельные глубины, исключающие искрение в процессе электроалмазного шлифования

Режим резания и параметры инструмента	Предельные глубины шлифования, мм													
Скорость продольного перемещения стола, м/мин:														
0,5	0,01	0,015	0,015	—	0,02	0,015	—	0,025	0,035	0,04	0,06	0,05	0,045	0,04
1,0	0,005	0,012	0,015	0,015	0,01	0,01	0,015	0,02	0,03	0,035	0,05	0,04	0,035	0,03
1,5	0,005	0,005	0,01	0,015	0,01	0,005	—	0,015	0,025	0,025	0,035	0,035	0,025	0,02
2,0	—	0,005	—	0,01	0,007	0,01	0,005	0,015	0,025	0,02	0,02	0,02	0,02	0,015
3,0	—	0,003	—	—	0,005	—	—	0,005	0,015	0,015	0,01	0,008	0,015	—
Ширина алмазоносного слоя, мм	10		10	20	10		20		10		20		10	
Концентрация круга, %	100		100		100	50	100		100		100		100	
Зернистость круга, %	63/50	100/80	80/63		100/80	80/63	50/40	80/63	80/63	125/100	100/80		80/63	
Подача электролита	Сбоку		Сбоку	От центра круга	Сбоку	Сбоку	От центра круга	Сбоку	От центр круга	Сбоку	Через отверстие в алмазном слое	Сбоку	От центра круга	Сбоку
Связка круга	М1		ТМ2		МС1		М15		М55		МВ1		М013	

Таблица 4.4

Рекомендуемые параметры электролитического шлифования

Схема шлифования	Зернистость	Концентрация, %	Связка	v_1, м/с	t, мм/дв. ход	P, кгс	v_1, м/мин	U_p, В
Заточка:								
обычная	80/63	100	МО13	20—25	—	1—3	—	6
глубинная	100/80	100	МВ1	20—25	0,3—0,5	0,2—0,5	—	8
Плоское шлифование торцом круга	80/63	100	М15	20	—	1—5	—	8
Глубинное шлифование периферией круга	125/100	100	МВ1	20—30	0,1—0,3	—	—	10
Круглое шлифование:								
наружное	100/80	100	МО13	25—30	0,3—0,5	—	10—15	6
внутреннее	100/80	150	МО13	10—25	0,03—0,05	—	10—15	8
Электроалмазное хонингование	100/80	150	МС1	1,6—3,2	—	5—12	—	6—12
Электроалмазная отрезка и прорезка	63/50	100	М1	15—20	0,05	—	—	4—6
Электролитическая правка:								
алмазная	125/100	25	ТМ2	0,3—0,6	—	0,5—1,5	15—20	10—14
абразивная	25	200	МВ1	20	1—2	1—2	0,6	14

Таблица 4.5

Силы резания при электролитическом шлифовании

Обрабатываемый материал	Характеристика алмазного круга	Режимы шлифования				Плотность тока, А/см²	P_z, кгс	P_y, кгс
		Скорость круга, м/с	Глубина шлифования, мм/дв. ход	Скорость стола, м/мин	Напряжение, В			
Т5К10	АЧК 150×10×3 АСП100/80 МС1 100%	29	0,01	1,3	8	61	0,5	5,5
			0,02			78	1,0	10,0
			0,03			90	1,6	13,0
			0,04			91	2,5	18,3
		29	0,03	0,9	8	78	0,8	9,3
				1,8		87	2,8	16,0
				2,6		73	3,8	19,3
ЮНДК35Т5	АЧК 150×10×3 АСП125/100 МВ1 150%	20	0,01	1,5	8	37	0,6	3,0
			0,02			46	1,25	7,5
			0,03			48	1,8	12,5
			0,04			50	2	16,0
		20	0,03	0,75	14	54	0	0
				1,0		64,5	0	0,75
				1,5		10	0,75	6,70
08Х15Н24ВЧТР	АЧК 150×10×3 АСП100/80 МС 100%	20	0,005	1,0	8	28	0	1,0
			0,02			50	1,0	6,8
			0,01	1,0		36	0	2,2
				2,0		50	2,0	6,0
20Х13	АЧК 150×10×3 АСП100/80 МС 100%	20	0,05	1,0	8	25	0,5	4,0
			0,02			40	2,25	17,2
			0,01	1,0		30	1,0	10,5
				2,0		40	2,3	12,8
15Х6СЮ	АЧК 150×10×3 АСП100/80 МС1 100%	20	0,005	1,0	8	32	0,5	3,0
			0,02			35	2,0	9,0
			0,01	1,0		35	0,5	5,4
				2,0		40	1,5	6,5

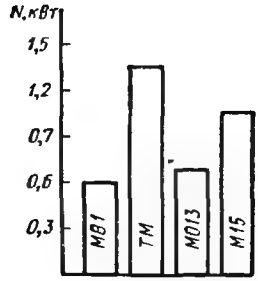


Рис. 4.3. Зависимость мощности N процесса от связки круга при электроалмазном врезном шлифовании материала ВК8 кругом АЧК 150×10×3×32 АСВ80/63 100%, $i = 100$ А/см²

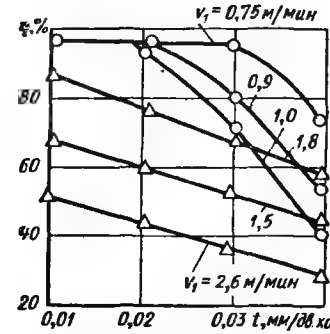


Рис. 4.4. Влияние глубины шлифования t и продольной скорости стола v_1 на долю анодного растворения η:

Δ — Δ — ВК8; ○ — ○ — ЮНДК35Т5

где η_1 — коэффициент, выхода по току; C — электрохимический эквивалент шлифуемого металла; l — длина детали; γ — плотность металла; L — длина двойного хода стола.

Производительность круглого наружного электролитического шлифования графитизированными абразивными кругами при стабильном процессе анодного растворения за один проход характеризуется толщиной слоя снятого металла

$$h = \frac{CI\,(l + B)}{\pi\gamma Dls}\,\eta_1,$$

где I — сила тока; B — ширина круга; D — диаметр заготовки; s — продольная подача заготовки.

Производительность процесса (г/мин) электроалмазного шлифования твердых сплавов с содержанием кобальта от 2 до 20% можно подсчитывать по формуле

$$Q = 6{,}65P^{0.72}K^{0.48}j^{0.34}\bar{x}^{-0.16}v^{0.26}K_1K_2K_3,$$

где K — концентрация алмазов, %; j — плотность тока, А/см²; v — скорость круга, м/с; $\bar{x}$ — средний размер зерна; K_1, K_2, K_3 — коэффициенты.

Общие закономерности изменения производительности от других параметров можно видеть из относительных величин, приведенных ниже. Коэффициенты K_1, K_2, K_3 показывают, как меняется производительность процесса Q по сравнению с условиями, при которых Q принята за единицу

Коэффициенты K_1, K_2, K_3, характеризующие производительность процесса электроалмазной обработки:

в зависимости от процента содержания кобальта в твердом сплаве:

Содержание кобальта, %	2	4	8	15	20
Коэффициент K_1	1,4	1,3	1,0	1,1	1,23

в зависимости от связки круга:

Связка круга	ТМ2	МС1	М15	МВ1	МО13
Коэффициент K_2	0,63	0,78	0,84	1,0	1,1

в зависимости от содержания шлама в электролите:

Содержание шлама, г/л	0	3,2	6,4	9,6	12,8
Коэффициент K_3	1,0	0,9	0,82	0,7	0,62

Некоторые данные производительности электроалмазного и электроабразивного шлифования твердых и магнитных сплавов в зависимости от характеристики круга, состава электролита и напряжения приведены в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Производительность электроабразивного и электроалмазного шлифования твердых и магнитных сплавов

Способ врезного шлифования	Обрабатываемый материал	Режим шлифования: Скорость круга, м/с	Скорость врезания, мм/с	Площадь контакта круга, см²	Напряжение, В	Характеристика круга	Состав электролита	Производительность, мм³/мин
Электроалмазный	ЮНДК35Т5 ЮН13ДК24	20	0,04 0,05	2	12	АСВ80/63 МВ1 100%	5% $NaNO_3$, 1% $NaNO_2$	480 600
	ВК8 ВК15	20	0,07 0,08	1	8	АСВ100/80 МВ1 100%	5% KNO_3, 1% KNO_2	445 496
Электроабразивный	ЮНДК35Т5 ЮН13ДК24	15	0,02 0,03	2	14	22А12МВ1 200%	5% NaCl	240 300
	ВК8	20	0,01	1	10		5% KNO_3, 1% KNO_2	68

Как известно, микрорельеф поверхности детали при обычном шлифовании формируется главным образом в результате резания алмазными или абразивными зернами. При электролитическом алмазном и абразивном шлифовании микрорельеф поверхности формируется одновременно при резании и электролитическом растворении выступающих гребешков поверхности металла. Шероховатость поверхности в результате электрохимического растворения при электролитических методах шлифования по сравнению с обычными несколько ниже.

Данные о влиянии продольной скорости стола v_1, глубины шлифования t, концентрации K, скорости круга v на шероховатость поверхности при электроалмазном шлифовании сплава ВК15 представлены на рис. 4.5 и 4.6.

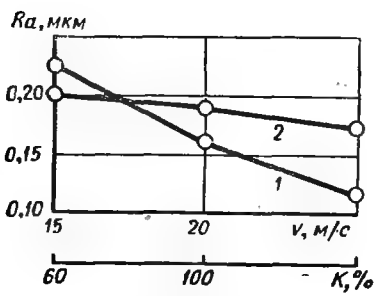


Рис. 4.5. Влияние скорости v и концентрации K круга АСП100/63 на шероховатость поверхности Ra при обработке твердого сплава:

1) $Ra = f(K)$; 2) $Ra = f(v)$

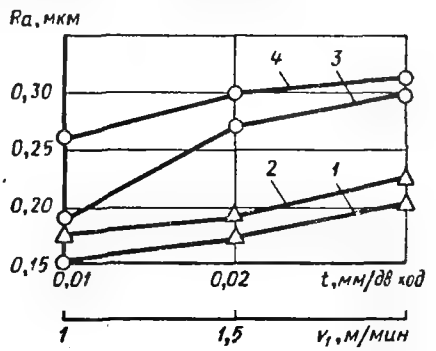


Рис. 4.6. Влияние глубины шлифования t и скорости подачи стола v_1 на шероховатость поверхности Ra при обработке твердого сплава:

1, 2 — круг АСП80/63; 3, 4 — АСП125/100; 1, 3—$Ra = f(v_1)$; 2, 4—$Ra = \varphi(t)$

Таблица 4.7

Параметры обработанной поверхности при электроалмазном и обычном алмазном шлифовании

Способ обработки	Связка круга	Марка и зернистость алмаза	Размеры круга	Материал обрабатываемой поверхности	Высота микронеровностей, мкм	Шероховатость *Ra*, мкм	Радиус скругления режущей кромки, мкм	Высота зазубрин режущей кромки, мкм
Электроалмазный	МВ1	АСВ125/100 АСР125/100	АЧК 150×10	ВК6	1,00	0,32	5—11	5
				ВК6 и сталь 45	1,06	0,32	11—15	12
				ВК6	1,29	0,32	10—11	5
				ВК6 и сталь 45	1,00	0,32	7—10	8
	МО13Э	АСВ125/100 АСР125/100	АЧК 150×20	ВК6	1,10	0,32	5—9	3
				ВК6 и сталь 45	0,84	0,32	5—7	6
				ВК6	0,93	0,32	5—9	6
				ВК6 и сталь 45	0,63	0,16	5—10	5
	МС2	АСВ125/100	АЧК 150×10	ВК6	1,06	0,32	5—6	8
				ВК6 и сталь 45	1,06	0,32	5—6	6
Обычный алмазный	МО13Э	АСР125/100	АЧК 150×20	ВК6	0,7	0,16	11—12	10
				ВК6 и сталь 45	1,1	0,32	5—8	8

Таблица 4.8

Прочность пластин из твердого сплава после электроалмазной обработки

Способ обработки	Материал обрабатываемой детали	Режим шлифования			$\frac{U, в}{I, А}$	Характеристика круга	Шероховатость поверхности граней Ra, мкм	Прочность пластин, кгс/мм²
		v, м/с	v_1, м/мин	t мм/дв. ход				
Абразивное шлифование	Т15К6 ВК8	12	1,0—1,5	0,03	—	63С, керамическая связка, зернистость 10—12	0,25	80
Анодно-механический	Т15К6 ВК8	14	—	—	$\frac{8—12}{8—10}$	—	0,03—0,45 0,25—0,3	95
Алмазное шлифование	Т15К6 ВК8	25	1,0—2,0	0,5—1,0	—	Связка металлическая, зернистость АСВ160/100, концентрация 100%	0,2—0,3	115
Химико-механический	Т15К6 ВК8	1,5—2,0	2,0—4,0	—	—	63С, зернистость 8—12	0,6—1,1	90
Электроалмазный	Т15К6 ВК8	25	—	—	10	Связка металлическая, зернистость АСВ125/100, концентрация 100%	0,2—0,1	115

Значения среднеарифметического отклонения Ra при электроалмазном шлифовании сплава ВК8 можно подсчитать по формуле

$$Ra = 8{,}9t^{0,19}v^{-0,28}v_1^{0,32}K^{-0,57}.$$

В условиях электроалмазного шлифования зернистость кругов оказывает малое влияние на величину шероховатости поверхности.

Параметры микрорельефа поверхности детали при электроалмазном и алмазном шлифовании твердого сплава и одновременной обработке твердого сплава и стали по результатам исследования приведены в табл. 4.7. В табл. 4.8 приведены значения предела прочности твердых сплавов, полученные после шлифования различными способами. Как правило, при электролитическом шлифовании отсутствует дефектный слой на обработанной поверхности, образующийся при обычном неэлектролитическом шлифовании.

Модернизация станков для электролитического шлифования. Отечественная промышленность выпускает специальные станки для электролитического шлифования. Но для этой цели можно применять станки общего назначения после некоторой модернизации.

К основным мероприятиям по модернизации станков относятся изоляция шпиндельного узла станка или зажимного приспособления от корпуса станка установка выпрямителя для введения в зону обработки постоянного тока, оснащение станка токосъемными устройствами для подачи электрического тока на шлифовальный круг и обрабатываемую деталь, оснащение станка системой подачи и очистки электролита, установка емкости и защитного кожуха для обеспечения слива электролита.

§ 4.2. Виброабразивная и магнитно-абразивная обработка

Шлифование с вибрациями

Весьма распространены в различных отраслях машиностроения и металлообработки виброгалтовка, виброполирование, виброотделка, виброобъемная обработка и другие однородные в технологическом отношении процессы, которые принято в общем называть виброабразивной обработкой.

Сравнительно меньшее распространение в практике получили процессы плоского и других видов шлифования с наложением колебаний низкой или высокой частот.

Виброабразивная обработка деталей. Вибрационная обработка деталей в абразивной среде представляет собой механический (электрохимический, термомеханический) процесс съема материала с обрабатываемой поверхности частицами (гранулами, зернами) рабочей среды, которые совершают колебания, вызываемые действием вибраций, сообщаемых рабочей камере с обрабатываемыми деталями и рабочей средой.

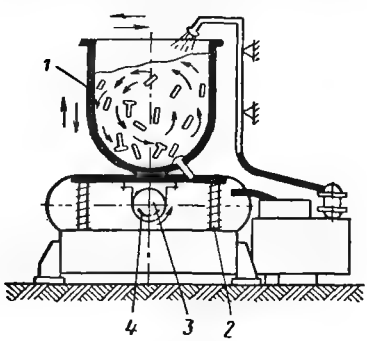


Рис. 4.7. Схема установки для вибрационной обработки деталей

Схема, показанная на рис. 4.7 [9], иллюстрирует принцип работы установки для виброабразивной обработки деталей, которые загружаются в рабочую камеру *1* вместе с рабочей средой. Камера установлена на пружинах *2* и может колебаться в различных направлениях. Источником колебаний служит вращение вала *3*, несущего несбалансированный груз *4*. Под действием колебаний камеры обрабатываемые детали и частицы рабочей среды испытывают переменные ускорения; направления их относительных

перемещений постоянно меняются, что приводит к возникновению контактных явлений, которые в связи со сравнительно высокой твердостью частиц рабочей среды обусловливают удаление малых объемов материала с обрабатываемых поверхностей. В процессе виброобработки детали занимают различное пространственное положение и поэтому обрабатываются все их поверхности.

Весьма часто различные операции виброабразивной обработки деталей производят в среде жидкого раствора. Это способствует снижению пылеобразования, лучшему удалению продуктов обработки с обрабатываемых поверхностей, поддержанию определенного термического режима в камере, а также интенсификации процесса в случае добавки в раствор соответствующих активных веществ.

Наиболее характерными операциями виброабразивной обработки являются очистка отливок, удаление окалины, снятие заусенцев, скругление острых кромок, удаление облоя, подготовка поверхностей под гальванические и лакокрасочные покрытия, декоративное и технологическое шлифование, полирование и отделка поверхностей, мойка и очистка деталей.

Виброабразивную обработку применяют для деталей, изготовленных из черных и цветных металлов и сплавов, пластмасс, резины и других конструкционных материалов. Следует отметить, что виброабразивная обработка сопровождается образованием упрочненного поверхностного слоя, обладающего повышенной микротвердостью и наличием остаточных сжимающих напряжений.

Производительность процесса виброабразивной обработки. Исследованиями установлено (рис. 4.8), что производительность процесса виброабразивной обработки повышается с увеличением амплитуды колебаний. Следовательно, с точки зрения повышения интенсивности съема материала следует выбирать наибольшие амплитуды колебаний, которые в современных установках достигают 5—7 мм. Производительность процесса изменяется в зависимости от частоты колебаний не монотонно. Для обработки материалов в различных условиях имеются диапазоны частот, при которых достигается наибольший съем материала. Так, при обработке бронзы, силумина и Ст.3 в рабочей среде, состоящей из электрокорундовых абразивных гранул размером 20—40 мм, оптимальными оказались частоты порядка 30—40 Гц [9].

Увеличение размеров гранул рабочей среды приводит к повышению интенсивности съема материала. Выбор размера гранул среды зависит от типа установки, характеристики рабочей среды, свойств обрабатываемого материала, режимов обработки. В современных установках используют в основном гранулы от 3 до 70 мм.

Существенное влияние на производительность процесса оказывает соотношение между объемами обрабатываемых деталей и рабочей среды. Относительное уменьшение деталей в рабочей камере приводит к увеличению интенсивности съема материала. Так, изменение соотношения с 1 : 4 до 1 : 1 привело к уменьшению съема материала в 2 раза [9].

Установлено, что на производительность виброабразивной обработки влияет форма рабочей камеры, а также высота ее заполнения. Для наиболее часто применяемых камер с формой дна, очерченного по радиусу r, предельная высота H камеры, определяющая оптимальную полноту ее загрузки, может быть подсчитана по формуле [47]

$$H = 2r + r\,\mathrm{tg}\,\alpha + h,$$

где $\alpha = 25 \div 30°$ — угол между статической и динамической плоскостями, проведенными через уровень загрузки камеры в состоянии покоя и при работе; $h = 50 \div 100$ мм — высота, обеспечивающая отсутствие выброса рабочей среды через верх камеры.

На производительность виброабразивной обработки влияют также характеристика (твер-

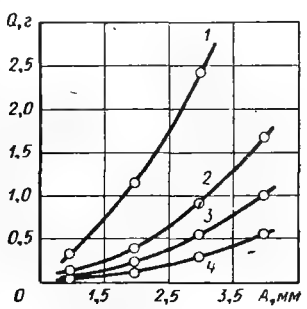


Рис. 4.8. Зависимость съема металла Q от амплитуды колебаний A:

1 — баббит Б-83; 2 — бронза БрО14; 3 — чугун СЧ 12-28; 4 — сталь У10А (закаленная)

дость, связка) абразивных гранул и физико-механические свойства (твердость, пластичность) обрабатываемого материала. Качественное влияние этих параметров на съем материала такое же, как и при других процессах абразивной обработки деталей.

Эмпирическая формула [9] позволяет подсчитать съем материала Q (в г) в зависимости от различных параметров процесса:

$$Q = \frac{3{,}8A^{1,25}tK_1K_2K_3K_4K_5}{HB^{0,91}}, \qquad (4.1)$$

где A — амплитуда колебаний, мм; t — продолжительность обработки, мин; K_1, K_2, K_3, K_4, K_5 — соответственно поправочные коэффициенты, учитывающие влияние частоты колебаний, размера гранул, зернистости абразива, объема загрузки рабочей камеры, массы обрабатываемых деталей; HB — твердость обрабатываемого материала.

Ниже приведены значения поправочных коэффициентов к формуле (4.1).

Частота колебаний $h_к$, кол/мин	750			1000			1500		2000		2500
K_1	0,10			0,45			0,80		1,00		1,10
Размер гранул d, мм	15			25			30		40		60
K_2	1,0			1,5			1,9		2,8		3,6
Зернистость абразива	63	50	40	32	25	20	16	12	10	8	4
K_3	1,00	1,92	0,83	0,80	0,70	0,68	0,66	0,65	0,63	0,60	0,55
Объем загрузки рабочей камеры V, м³	0,87			0,70			0,50			0,33	
K_4	1,25			1,00			0,60			0,45	
Масса обрабатываемой детали G, г	20—50	50—70	70—90	90—100	110—130		130—180	180—230		230—300	300—
K_5	0,8	1,0	1,2	1,3	1,4		1,6	1,8		1,9	2,1

Существенное влияние на увеличение производительности виброабразивной обработки оказывают химически активные вещества, которые подают в рабочую камеру с раствором. Исследования влияния поверхностно-активных веществ (ПАВ) на производительность виброабразивной обработки деталей, проведенные при амплитудах колебаний до 5 мм, в камере емкостью 7 дм³, куда подавалась жидкость со скоростью 0,15—0,18 л/мин, при рабочей среде, состоящей из карборундовых (63СМ20СТК6) гранул прямоугольного сечения с размерами 15×20×30 мм, показали, что наиболее эффективными оказались следующие составы ПАВ: смесь натровых солей низкомолекулярных синтетических кислот фракций C_5—C_6 (гексановой и гептановой) и смесь оксиэтилированных моноэтаноламидов кислот фракции C_{10}—C_{16}. Применение этих ПАВ привело к интенсификации съема материала в 1,5—1,6 раза и к повышению коррозионной стойкости обработанных поверхностей в 2—3 раза

Качество обработанных поверхностей после виброабразивной обработки. Шероховатость обработанных поверхностей по мере увеличения времени виброобработки интенсивно снижается до некоторых значений высот микронеровностей, после чего дальнейшее увеличение времени обработки несущественно изменяет шероховатость поверхностей. Так, при обработке стали, силумина и других материалов через 250—300 мин высоты микронеровностей Rz снизились с 10—20 мкм до 2—4 мкм, а через 500 мин практически оставались неизменными [9].

Существенное влияние на шероховатость обработки оказывает характеристика абразивной рабочей среды. Уменьшение зернистости от 63 до 4 приводило к снижению значений Ra при обработке чугунных (Сч 12-28) деталей с 3,0 до 0,1 мкм, а стальных (У10А) закаленных деталей — с 2,10 до 0,71 мкм [9]. Высоту микронеровностей Ra (мкм) в зависимости от среднего размера зерен x (мкм) абразивной среды можно определить по формуле

$$Ra = Cx^m. \qquad (4.2)$$

Значение показателя степени m и коэффициента C даны в табл. 4.9.

Твердость и связка абразивных гранул, а также свойства обрабатываемых материалов влияют на шероховатость обработки в качественном отношении ана-

Таблица 4.9

Значения показателя степени m и коэффициента C в формуле (4.2)

Обрабатываемый материал	m	C	Обрабатываемый материал	m	C
Стали					
Ст3	0,51	0,113	СЧ 12-28	0,53	0,103
Ст6	0,44	0,120	БрО14	0,64	0,059
45	0,64	0,055	Б83	0,37	0,509
У10А	0,42	0,140	АЛ3	0,47	0,234
			Д16	0,64	0,085

логично тому, как это наблюдается и при других технологических процессах абразивной обработки.

Амплитуда колебаний существенно влияет на шероховатость обработки; с ее увеличением высота микронеровностей возрастает, если детали предварительно прошлифованы (исходные значения Ra до 0,5 мкм). При этом увеличение амплитуды колебаний от 0 до 5 мм влечет за собой повышение Ra до 3,0 мкм. Если же в исходном состоянии обрабатываемые поверхности деталей имеют значение $Ra = 3 \div 6$ мкм (например, фрезерованные или точеные детали), то с увеличением амплитуды колебаний вначале значения Ra снижаются (до 1,5—2,0 мкм при амплитуде 1—2 мм), а затем повышаются, достигая тех же величин, которые получаются при виброобработке предварительно шлифованных деталей.

Частота колебаний незначительно изменяет шероховатость обработки; наблюдается тенденция к некоторому ее улучшению с повышением частоты вибрации. Рядом исследований установлено, что в результате виброабразивной обработки экономически оправданным является уменьшение шероховатости с 5 до 0,62 мкм.

Виброабразивная обработка способствует тому, что поверхностный слой деталей приобретает, как правило, благоприятные физико-механические свойства. Сжимающие остаточные напряжения с глубиной залегания до 8—15 мкм наблюдаются при виброобработке деталей из закаленных сталей. Микротвердость поверхностных слоев возрастает в 1,2—1,6 раза по сравнению с исходной микротвердостью металла. Исследования показали, что в результате виброабразивной обработки сколько-нибудь значительных структурных изменений поверхностных слоев не происходит. Таким образом, наклепанный слой у деталей, прошедших виброабразивную обработку, достигая значений 0,07—0,10 мм, не только не ухудшает, но, напротив, улучшает эксплуатационные показатели работы деталей.

Оборудование и устройства для виброабразивной обработки.

По характеру вибрации рабочей камеры установки и устройства принято делить на однокомпонентные, двухкомпонентные и трехкомпонентные, в которых вибрации соответственно направлены в одном, двух и трех направлениях. Наиболее благоприятные условия обработки создаются в двух- и трехкомпонентных установках.

По современным представлениям на 1 кВт мощности электродвигателя привода вибратора приходится примерно 50 л объема рабочей камеры. Однако по мере увеличения объема камеры удельные мощности установок снижаются, достигая 100—200 л на 1 кВт.

Одной из основных характеристик виброабразивных установок является объем рабочей камеры, определяющий технологические и конструктивные особенности устройства. В практике виброобработки находят применение установки одно- или многокамерные с объемом камер от 5 до 28 000 л. В табл. 4.10 представлены технические характеристики некоторых отечественных и зарубежных установок, получивших широкое применение в практике.

Для обработки мелких деталей применяют вибрационные установки мод. ПР377, ПР376М и ПР355М, имеющие цилиндрическую форму рабочей камеры со сферическим дном.

Таблица 4.10

Технические характеристики установок для виброабразивной обработки деталей

Модель, марка, фирма	Объем рабочей камеры, л	Число рабочих камер	Мощность двигателя привода вибратора, кВт	Режим колебаний		Габаритные размеры (длина × ширина × высота), мм
				Амплитуда, мм	Частота, Гц	
УВГ-4×10	10	4	1,0	0—5,0	15; 33; 50	1300×952×1370
УВГ-2×50	50	2	—	0—5,0	24	—
УВГ-100	100	1, 2, 4	1,5	0—5,0	25; 42	1750×1000×1500
УВГ-200	200	1	4,5	0—7,0	25; 33	1880×1740×1340
ВМ-05	8	—	—	0,5—2,2	—	—
ВУД-125	50	2	—	1,0—5,0	—	—
Вальтер (ФРГ)	145	2	11,0	—	—	2500×2000×1300

При применении так называемой шпиндельной вибрационной обработки деталей (обычно тел вращения) последние устанавливают на шпиндель универсального (вертикально- или настольно-сверлильного) или специального станка. Вибрирующую рабочую камеру устанавливают на столе станка либо на специальной подставке.

В табл. 4.11 приведены характеристики установок, применяемых для шпиндельной виброабразивной обработки.

Рабочие среды. Состав рабочей среды выбирают в зависимости от характера операции, требований к качеству обработки, формы, размеров и материала обрабатываемых деталей. В табл. 4.12 приведены составы рабочих сред, применяемых при виброабразивной обработке.

Следует отметить, что все большее распространение находят специальные абразивные наполнители, имеющие форму пирамид, параллелепипедов, призм, кубиков, звездочек и других геометрических тел.

Перспективы виброабразивной обработки деталей [9]. Новыми и перспективными способами вибрационной обработки деталей являются электрохимическая, магнитновиброабразивная и вибротермомеханическая.

При электрохимической виброобработке деталь погружают в вибрирующую абразивную среду, в которой непрерывно циркулирует электролит. При прохождении через электролит и рабочую среду электрического тока происходит анодное растворение поверхностного слоя материала детали. Гранулы рабочей среды при этом осуществляют интенсивное удаление продуктов растворения, а также части нерастворенного металла. Исследования, выполненные на экспериментальной установке (сила тока 80 А, напряжение 20 В, электролит — 20%-ный

Таблица 4.11

Технические характеристики установок для шпиндельной виброабразивной обработки (амплитуда колебаний 0—5 мм)

Тип станка	Частота вращения шпинделя, об/мин	Число шпинделей	Мощность привода шпинделей, кВт	Объем рабочей камеры, л	Число рабочих камер	Мощность привода вибратора, кВт	Частота, Гц
НС-12	1500; 2000; 3000	1	1	15	1	1,0	25; 42
2А125	2000; 3000	6	2	225	2	1,2	25; 33
Специальный полуавтомат	2500	12	2,5	70	—	1,0	25

Таблица 4.12

Рабочие среды, применяемые при виброабразивной обработке

Состав и характеристика рабочей среды		Операции обработки	Материал обрабатываемых деталей
Твердый наполнитель	Жидкий раствор		
Абразивная крошка из электрокорунда 24А зернистостью 25—125 на керамической связке твердостью Т—ЧТ	Содовый	Снятие заусенцев, окалины, зачистка облоя	Сталь, чугун, медные сплавы
	Всухую	Грубое шлифование	
Абразивная крошка из электрокорунда 24А зернистостью 12—50 на керамической связке твердостью СТ1	Содовый	Снятие заусенцев и облоя, скругление острых кромок	Бронза, латунь
Абразивная крошка из зеленого карбида кремния 63С зернистостью М20 на керамической связке твердостью СТ3	С применением ПАВ	То же	Закаленные стали
Абразивная крошка из электрокорунда 24А зернистостью 25—40 на керамической связке твердостью СТ—Т	Содовый	Скругление острых кромок до получения радиуса 200—300 мкм	Сталь, бронза, латунь, алюминиевые сплавы
Абразивная крошка из электрокорунда 24А зернистостью 8—16 на керамической связке твердостью Т—ЧТ	Содовый	Снятие небольших заусенцев, скругление острых кромок, чистовое шлифование	Сталь, чугун, медные сплавы
	Хромового ангидрида		Алюминиевые сплавы
Абразивная крошка из электрокорунда зернистостью 24А на керамической связке твердостью Т—ЧТ	Всухую с добавлением сухого льда	Снятие и зачистка облоя	Резина
	Всухую	Снятие облоя и грубое шлифование	Пластмасса
Абразивная крошка из черного карбида кремния 54С зернистостью 6—8 на керамической связке твердостью ВТ	Содовый или мыльно-содовый	Снятие небольших заусенцев, скругление острых кромок, полирование	Сталь, чугун, цветные металлы, сплавы, пластмассы
Абразивная крошка зернистостью 10—25 на бакелитовой или вулканитовой связке твердостью Т—ВТ	Содовый	Чистовое шлифование	Сталь, чугун, цветные металлы и сплавы
Специальный абразивный инструмент СА-4 и К-10 (правильные трехгранные призмы)	0,5 г/л кальцинированной соды, 0,5 г/л олеиновой кислоты, 0,5 г/л моющего концентрата ОП-10	Подготовка поверхностей под гальваническое покрытие	Латунь

Состав и характеристика рабочей среды		Операции обработки	Материал обрабатываемых деталей
Твердый наполнитель	Жидкий раствор		
Специальные абразивные гранулы ПТ-10, ПТ-15, ПТ-20, ПТ-30 (трехгранные призмы)	Содовый	Снятие заусенцев, скругление кромок	Сталь, алюминиевый сплав
Фарфоровый бой с размером гранул 15—25 мм, войлочные пыжи размером 25×25×25 мм	20—30 г/л тринатрийфосфата технического, 10 г/л калия двухромовокислого 0,2—0,3 г/л моющего средства ОП-10	Подготовка поверхностей под гальваническое покрытие	Латунь
Фарфоровые шары, дробленые крошки	Содовый или мыльно-содовый	Снятие небольших заусенцев, скругление кромок, полирование	Сталь, цветные металлы и сплавы
Дробленый блок переплавленных отходов абразивных кругов	Содовый или всухую	Снятие заусенцев, грубое шлифование, скругление кромок, очистка от окалины и коррозии	
Стеклянная крошка или стеклянные шары	Содовый и мыльный с добавлением 1%-ной олеиновой кислоты	То же	
	Хромпика		Алюминиевые сплавы
	1%-ный раствор $CuSO_4$	Шлифование и полирование	Сталь, чугун, медные сплавы
Стеклянная крошка	Содовый	Скругление острых кромок до получения радиуса 50—100 мкм	Сталь, бронза, латунь, алюминиевые сплавы
Тровалит	Содовый	Скругление острых кромок до получения радиуса 50—100 мкм	Сталь, бронза, латунь
Галька (кварцевая)	Содовый и мыльно-содовый	Снятие небольших заусенцев, скругление кромок, полирование	—
Кварцевый щебень	Содовый	Шлифование	—

Состав и характеристика рабочей среды		Операции обработки	Материал обрабатываемых деталей
Твердый наполнитель	Жидкий раствор		
Известняковый щебень	Содовый и мыльно-содовый	Полирование	Сталь, чугун, цветные металлы и сплавы
Дробленый гранит	То же	Шлифование и полирование, снятие заусенцев, скругление кромок	Сталь, чугун, цветные металлы
Дробленый мрамор	То же	Шлифование, полирование, скругление острых кромок	Сталь, чугун
Литейный дробленый шлак (вагранoчный) с добавлением крупнозернистой абразивной крошки	Содовый —	Грубое шлифование, снятие окалины, снятие заусенцев, скругление кромок	То же
Стальная и чугунная дробь, стальная проволока с добавлением абразива зернистостью 40—125 и твердостью СТ—ВТ	Содовый	Снятие заусенцев и окалины, очистка отливок	Сталь, чугун, бронза
Отходы холодной и горячей штамповки черных и цветных металлов с абразивными материалами различной зернистости	Содовый или мыльно-содовый; для грубых операций 1%-ный раствор $CuSO_4$	Снятие заусенцев, скругление кромок, снятие окалины, очистка отливок	То же
Стальные закаленные полированные шарики	Содовый или мыльно-содовый с добавлением 1%-ной олеиновой кислоты	Отделка, наклеп, удаление облоя, нанесение пленок с защитными свойствами при наличии соответствующих растворов или суспензий	Сталь, пластмассы
Литые звездочки (стальные и чугунные)	Содовый или всухую	Очистка отливок, снятие заусенцев и окалины	Сталь, чугун
Древесная крошка с добавлением шлифпорошков	Всухую или при слабом увлажнении	Чистовое шлифование, полирование	Сталь, цветные металлы и сплавы
Войлочные пыжи с пастами	Всухую	Полирование, отделка	То же
Обрезки кожи с пастами	Всухую	Полирование, глянцевание	То же
Ореховая скорлупа с пастами	Всухую	То же	То же
Резиновая крошка	Моющий	Очистка от загрязнений	То же
Опилки и крошка из древесины	Продувка подогретым воздухом	Сушка после промывки	Сталь, цветные металлы и сплавы

раствор поваренной соли, рабочая среда — электрокорундовое шлифзерно № 32, обрабатываемые детали — кольца из стали ШХ15, закаленной до *HRC* 62—64), показали, что интенсивность съема материала возрастает в 5—7 раз по сравнению с виброобработкой без электрического тока.

Наложение магнитного поля на пространство рабочей камеры установки для виброабразивной обработки деталей позволяет активизировать процесс путем затормаживания или сообщения деталям (либо гранулам рабочей среды) осциллирующих движений в направлении, перпендикулярном к плоскости вращения рабочей среды. При таком затормаживании происходит определенное изменение относительной скорости скольжения режущих элементов и обрабатываемых деталей, приводящее к увеличению сил взаимодействия и съема материала в 1,5—3,5 раза.

Вибротермомеханическая обработка состоит в том, что тем или иным способом в пространство рабочей среды вводятся тепловые потоки, обеспечивающие определенный термический режим в камере. При этом наблюдается повышение (упрочнение и стабилизация) качества обработанных поверхностей.

Шлифование с наложением вибраций чаще всего используют при обработке материалов (твердых сплавов, быстрорежущих сталей, магнитно-мягких материалов), проявляющих склонность к трещинообразованию и снижению определенных свойств (например, магнитных) в результате их абразивной обработки. Наличие вибрации круга или детали способствует интенсивному самозатачиванию инструмента, что в процессе всего периода обработки обеспечивает его высокие режущие свойства, приводящие к снижению температуры при шлифовании.

Вибрационное шлифование твердых сплавов Т15К6 абразивными кругами 63С25СМ1К ($v = 25$ с; $v_1 = 1 \div 8$ м/мин; $t = 0{,}03 \div 0{,}05$ мм/дв. ход) с частотой 18 кГц позволило ликвидировать трещинообразование и снизить шероховатость в 1,5 раза по сравнению с работой без вибраций. При низкочастотных колебаниях (100 Гц) также резко сокращалось трещинообразование пластин, но шероховатость обработки при этом не изменялась. Износ круга в том и другом случаях возрастает в 1,5—1,7 раза. Применение вибрации частотой 25—100 Гц при шлифовании твердых сплавов способствует снижению сил резания на 18—20%, а температуры шлифования в 1,2—1,4 раза. Аналогичные результаты получены при шлифовании быстрорежущих сталей.

Исследования показывают, что использование высокочастотных колебаний не имеет явно видимых преимуществ по сравнению с применением колебаний невысокой частоты. В то же время при создании высокочастотных колебаний необходимо применение сложной и дорогостоящей аппаратуры, поэтому более предпочтительны устройства, обеспечивающие колебания низких частот (по крайней мере при шлифовании твердых сплавов). В последнем случае можно вместо каких-либо специальных источников вибраций использовать весьма простые приспособления консольного типа [59], сочетающие преимущества упругого и вибрационного шлифования. Тензометрирование показало, что рабочие элементы приспособлений консольного типа колеблются с частотами 100—200 Гц.

Магнитно-абразивное полирование

Магнитно-абразивное полирование (МАП) предназначено для снятия тонких (0,005—0,030 мм) слоев металла и улучшения качественных характеристик обработанных поверхностей. При магнитно-абразивном полировании обрабатываемую деталь *1* и порошок, обладающий ферромагнитными и абразивными свойствами *2*, помещают между полюсами электромагнита *3* (рис. 4.9). Детали, порошку или полюсам магнита сообщают относительные движения, характер и интенсивность которых зависят от габаритных размеров и формы обрабатываемой поверхности. При полировании тел вращения используют три относительных движения: вращение, продольное возвратно-поступательное и осциллирующее. Главное вращательное движение вокруг собственной оси сообщают, как правило, детали, а продольное возвратно-поступательное движение подачи и осциллирующее движение детали, порошку или полюсам электромагнита.

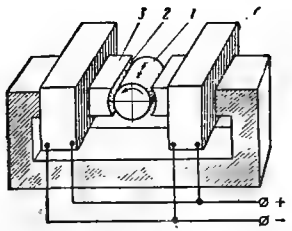


Рис. 4.9. Схема магнитно-абразивного полирования наружных поверхностей тел вращения

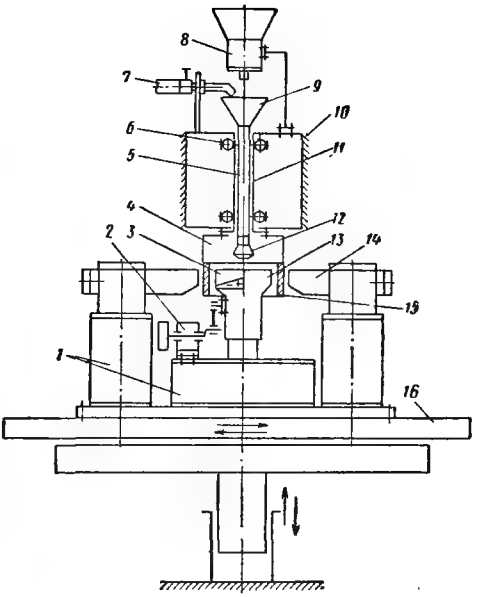


Рис. 4.10. Схема установки для магнитно-абразивного полирования отверстий:

1 — магнитная система; *2* — механизм осцилляции детали; *3* — лоток подачи порошка в зону резания; *4* — оправка для крепления детали; *5* — трубопровод; *6* — подшипник полого шпинделя; *7* — кран подачи СОЖ; *8* — бункер-дозатор порошка; *9* — воронка; *10* — станина фрезерного станка; *11* — полый шпиндель; *12* — насадка; *13* — рабочий полюс электромагнита; *14* — наружные вспомогательные полюса электромагнита; *15* — обрабатываемая деталь; *16* — стол фрезерного станка

При МАП внутренних поверхностей рабочие полюсные наконечники электромагнита входят внутрь отверстия, а вспомогательные — охватывают деталь (рис. 4.10). Обработку поверхностей производят, как правило, без осциллирующего движения. Кинематические схемы МАП при этом идентичны шлифованию торцом или периферией круга. Схема установки для магнитно-абразивного полирования показана на рис. 4.11. Тела вращения небольших размеров и фасонного профиля обрабатывают на станках роторного типа (рис. 4.12), у которых продольная подача заменена движением по кругу или планетарным вращением по кольцевой ванне.

При всех схемах обработки магнитное поле выполняет роль связки, формирующей из отдельных зерен порошка эластичный абразивный инструмент, и обеспечивает силовое воздействие, с помощью которого зернам порошка сообщаются нормальные и тангенциальные силы резания (при величине магнитной индукции в рабочем зазоре 0,6—1,8 Т и давлении порошка на деталь 8—10 кгс/см^2).

Особенностью формируемого магнитным полем абразивного инструмента является его способность нивелироваться относительно обрабатываемой поверхности детали, копируя ее профиль. При этом можно полировать сложнопрофильную поверхность, используя прямолинейное движение осцилляции, и нет необходимости периодически править инструмент.

В зависимости от режимов обработки и параметров магнитного поля процесс МАП может приобретать характерные признаки полирования жестким инструментом (суперфиниширования, микрохонингования, хонингования и др.) или обработки струей свободного абразива. В случае полирования жестким инструментом интенсивно срезаются исходные микронеровности (уменьшается шероховатость поверхности), улучшается точность формы (в 8—10 раз уменьшается волнистость и в 1,5—4 раза — гранность), увеличивается твердость, контактная и усталостная прочность поверхности детали, значительно снижается величина растягивающих остаточных напряжений, возникших на предшествующей операции шлифования, и уменьшается процентное содержание остаточного аустенита в поверхностном слое детали. При удалении всего дефектного слоя металла (0,01—

0,02 мм) у закаленной детали остаточные напряжения на полированной поверхности всегда сжимающие величиной 100—140 кгс/мм², а содержание остаточного аустенита в слое глубиной до 0,005 мм на 1—7% ниже, чем в толще металла детали. На рис. 4.13 показан характер изменения геометрических параметров детали в зависимости от времени обработки.

В случае обработки струей свободного абразива обрабатываемая поверхность детали по геометрической точности формы получается такой же, как и при обработке МАП, только высота гребешков становится меньше и изменяется микропрофиль микронеровностей.

Собственная глубина следов обработки МАП составляет 0,16—0,04 мкм, что соответствует шероховатости $Ra = 0{,}020 \div 0{,}160$ мкм, поэтому этот метод применяют, как правило, для полирования предварительно шлифованной поверхности. Однако, если требуется только уменьшение микронеровностей поверхности, то метод можно применять и для полирования небольших термически не обработанных деталей, имеющих исходную шероховатость поверхности в пределах $Rz = 10 \div 40$ мкм.

Магнитно-абразивным полированием можно обрабатывать детали любой геометрической формы и любых размеров из магнитных и немагнитных материалов. Однако наибольшее применение этот метод получил при чистовой обработке плоских поверхностей, наружных и внутренних поверхностей тел вращения простой и фасонной формы.

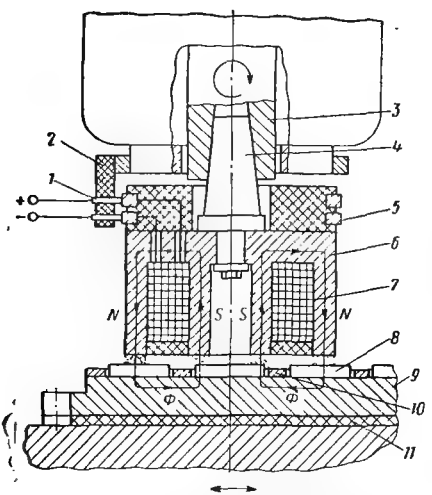


Рис. 4.11. Схема установки для магнитно-алмазного полирования поверхности:

1 — щетка токосъемного устройства; 2 — кронштейн; 3 — шпиндель фрезерного станка; 4 — оправка; 5 — контактные кольца; 6 — корпус электромагнитного индуктора; 7 — катушка электромагнита; 8 — обрабатываемая деталь; 9 — плита; 10 — трафарет, ограничивающий сдвиг детали по плоскости плиты; 11 — прокладка из диамагнитного материала, изолирующая плиту от стола станка

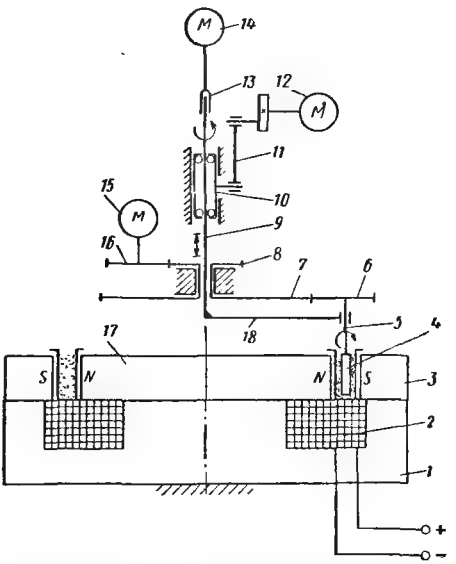
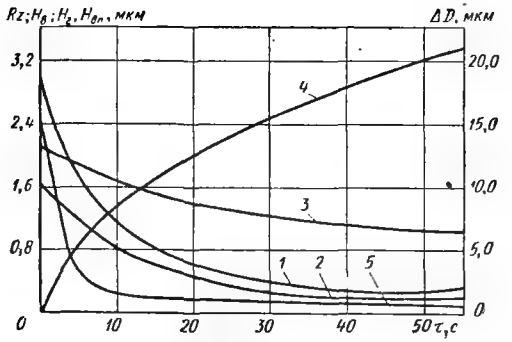


Рис. 4.12. Схема роторного станка для МАП наружных поверхностей тел вращения:

1 — магнитопровод; 2 — катушка электромагнита; 3 — полюсный наконечник; 4 — обрабатываемая деталь; 5 — шпиндель; 6 — планетарная шестерня; 7 — центральное зубчатое колесо; 8 — шестерня привода вращения детали; 9 — водило; 10 — ползун; 11 — шатун кривошипно-шатунного механизма осцилляции детали; 12 — двигатель осцилляции; 13 — телескопическая муфта; 14 — двигатель механизма вращения детали; 15 — электродвигатель; 16 — шестерня; 17 — центральный полюсный наконечник; 18 — водило

Рис. 4.13. Характер изменения геометрических параметров детали при МАП:

1 — шероховатость Rz; *2* — волнистость $H_в$; *3* — гранность $H_г$; *4* — съем по диаметру детали ΔD; *5* — продольная волнистость $H_{вп}$



Параметры магнитного поля и режимы МАП приведены ниже.

Параметры магнитного поля и элементы режима	Значения параметров и режимов
Магнитная индукция в рабочем зазоре, Т	0,6—1,8
Величина рабочего зазора, мм	0,3—3,0
Величина зерен порошка, мм	0,05—0,30
Размерный съем, мм	0,005—0,03
Давление порошка на деталь, кгс/см²	8—10
Скорость:	
вращения детали, м/с	0,15—5,00
движения осцилляции, м/с	0,01—0,50
Амплитуда осцилляции, мм	0,3—3,0
Подача стола станка, мм/с	0,01—15,00
Машинное время обработки, с	15—120

МАП происходит с подачей в зону резания 5—10% раствора товарного эмульсола марки Э-2 в воде. Порошки для МАП должны обладать следующими свойствами: высокой магнитной индукцией насыщения, магнитной проницаемостью, абразивными свойствами, износостойкостью, теплопроводностью и химической стойкостью, а также низкой электросопротивляемостью. В табл. 4.13 приведены основные свойства и технологические показатели порошков, применяемых для МАП. Их абразивные свойства оценивались величиной съема металла и значением шероховатости поверхности после 30 с обработки образцов из стали ШХ15 (*HRC* 58—62) диаметром 37 мм, длиной 32 мм и при исходной шероховатости $Ra = 1{,}25$ мкм.

Для МАП в серийном, крупносерийном и массовом производствах применяют двухкомпонентные материалы, получаемые методом порошковой металлургии. Наибольшей производительностью обладают порошки на железной основе с добавками карбида титана или электрокорунда.

Таблица 4.13

Свойства и технологические показатели магнитно-абразивных материалов

Магнитно-абразивный материал	Магнитная проницаемость μ, ×864 гс/Э	Съем металла (10^{-3}), г	Шероховатость поверхности *Ra*, мкм
Ферросплавы:			
Ферросилиций (6,5% Si)	9,3	27	0,130
Ферроалюминий (13% Al)	8,9	23	0,385
Альсифер (9,6% Si, 5,4% Al)	8,4	19	0,163
Ферробор (17% B)	3,3	8	0,430
Материалы на основе железа и тугоплавких соединений			
Fe + 10% TiC	6,8	180	0,040
Fe + 20% Al_2O_3	6,4	108	0,065
Fe + 15% Cr_3C_2	5,6	96	0,160
Fe + 10% ZrC	6,5	90	0,080
Fe + 30% W_2B_5	6,1	70	0,450
Fe + 20% WC	6,4	56	0,104

§ 4.3. Алмазное сверление

На машиностроительных и приборостроительных заводах все более широкое применение находит процесс алмазного сверления стекла, пластмасс, бетона, железобетона, кварца, минералокерамики, ситаллов, твердого сплава и других хрупких материалов; так, например, сверление точных отверстий в бетоне и железобетоне для крепления оборудования с помощью анкерных цанговых болтов. Такие отверстия в большом количестве осуществляют с помощью алмазных сверл.

Алмазный инструмент для сверления отверстий изготовляют в виде трубок, коронок и игл. Конструкция инструментов зависит от характера выполняемой технологической операции, глубины сверления, диаметра отверстия и обрабатываемого материала.

Игольчатые алмазные сверла выполняют в виде цилиндрических и конических алмазных игл, режущая часть которых состоит из алмазного порошка и связки; они предназначены для обаботки отверстий диаметром до 6 мм в тонкостенных деталях и кристаллах алмазов.

При изготовлении алмазных волок и камней для часов необходимо сверлить отверстия малых диаметров (менее 0,3 мм). Отверстия диаметром менее 0,075 мм в камнях для часов сверлят игольчатым сверлом в виде стальной проволоки с алмазным слоем на рабочем конце. При этом волоку закрепляют в головке, имеющей частоту вращения ~ 35 000 об/мин. Инструмент имеет возвратно-поступательное движение.

При сверлении и рассверливании каналов применяют проволоку без алмазного слоя. В этом случае на поверхность заготовки наносят каплю растительного или минерального масла, в котором во взвешенном состоянии находится алмазный порошок. Зернистость порошка выбирают с таким расчетом, чтобы размер зерна был ~ 0,04 диаметра проволоки, а концентрация порошка составляла бы 0,2 карата на 1 см³ масла.

Кольцевые сверла с алмазоносным слоем (рис. 4.14) нашли широкое применение в промышленности. Основные размеры применяемых конструкций приведены в табл. 4.14.

Сверлильные головки и алмазные сегментные сверла. Для сверления (вырезания) цилиндрических заготовок диаметром до 600 мм и толщиной от 10 до 35 мм применяют алмазные сверла, имеющие форму трепанирующей головки (рис. 4.15). Размеры сверл и сегментов к ним приведены в табл. 4.15. Корпуса сверл изготовляют из стали или серого чугуна. Алмазные сверла, предназначенные для сверления через кондуктор, изготовляют с цилиндрической направляющей частью.

В алмазных кольцевых сверлах применяют порошки природных алмазов марки А (ГОСТ 9206—70). Зернистость алмазов должна быть в пределах 400/315—160/125, концентрация алмазов в рабочей части коронки сверла 100%. Допускается изготовление алмазного слоя с 75 и 125%-ной концентрацией. Радиальное биение боковой поверхности алмазоносного слоя относительно наружной поверхности сверла или корпуса коронки должно быть не более 0,2 мм для сверл диаметром до 32 мм, не более 0,3 мм для сверл диаметром свыше 32 мм и не бо-

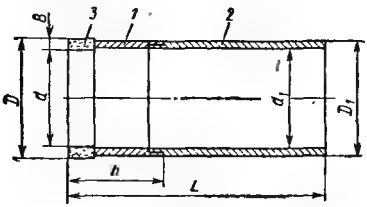


Рис. 4.14. Сверло кольцевое алмазное:

1 — корпус; *2* — удлинитель; *3* — алмазоносный слой

Таблица 4.14

Основные размеры (мм) алмазных кольцевых сверл

D	B	$D-D_1$	d_1-d
3,5	1,0	—	—
8	1,2	—	—
10—50	1,5	1,0	0,2
55—100	2,0	4,0	0,2

Таблица 4.15

Размеры (мм) алмазных сегментных сверл (рис. 4.16) ($H = 50 \div 75$ мм)

D	d	Сегменты	
		Число	Размеры, мм
101—125	98—122	5	20×10×1,5
126—150	123—147	6	20×10×1,5
151—175	148—172	7	20×10×1,5—2
176—200	173—197	8	20×10×1,5—2
201—225	198—221	9	20×10×2
226—250	222—246	10	20×10×2

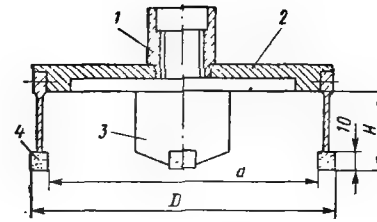


Рис. 4.15. Алмазная сверлильная головка:

1 — корпус; *2* — коромысло; *3* — сегмент; *4* — алмазоносный слой

лее 0,4 мм для сверл диаметром до 160 мм. Торцовое биение алмазоносного слоя относительно наружной поверхности корпуса коронки не должно превышать 0,5 мм. Трубы для корпусов коронок изготовляют из сталей 20, 35 или 10Г2С1, а трубы для удлинителей — из сталей марок 40Х и 35СГ или 36ГС2. Допускается изготовление удлинителей из сталей 35 и 45.

Конструкция алмазного сегментного сверла, показанная на рис. 4.16, позволяет использовать сегменты одного и того же размера для сверл разных диаметров. Коронка у таких сверл более прочная.

Сегментное сверло состоит из коронки *1* и удлинителя *2*. На торце кольцевого корпуса коронки выполнены сквозные прямоугольные пазы, в которые без зазора впаяны алмазоносные режущие сегменты *3*. В результате образуется коронка, у которой сегменты *3* чередуются с перемычками *4*. На торцовой, внутренней и наружной поверхностях перемычек предусмотрены наклонные промывочные окна и пазы. Пазы на внутренней поверхности наклонены под углом 30° к оси сверла в сторону его вращения для улучшения подвода охлаждающей жидкости в зону резания. Пазы на наружной поверхности имеют такой же наклон, но повернуты в сторону, противоположную вращению. Пазы на внутренней поверхности сверла соединены с пазами на наружной поверхности промывочными окнами, расположенными на торце и повернутыми на угол 30° в сторону вращения сверла.

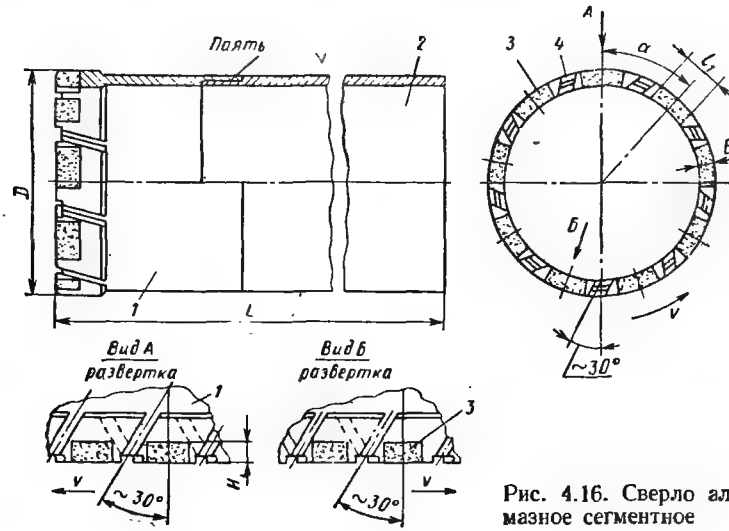


Рис. 4.16. Сверло алмазное сегментное

Таблица 4.16

Алмазные сегменты к сверлам

D, мм	B, мм	l_1, мм	z, шт.	Расход алмазов, карат/сегмент	D, мм	B, мм	l_1, мм	z, шт.	Расход алмазов, карат/сегмент
30—37	2	5,5	9	0,45	120—160	3	22	10	2,61
38—45	2	11	6	0,9	160—295	3	22	16	2,61
46—56	2	11	7	0,9	295—325	3	22	20	2,61
57—65	2	11	8	0,9	325—500	3	22	24	2,61
66—80	2	11	10	0 9	500—800	3	22	36	2,61
81—100	3	11	10	1,3	800—1000	3	22	50	2,61
101—120	3	11	10	1,3					

Исследования показали, что производительность сегментных сверл, снабженных промывочными пазами и окнами, в 1,2—1,35 раза выше, чем у сверл, не имеющих окон и пазов.

Алмазоносные сегменты крепят в пазах пайкой (припой — латунь Л-62). Корпус коронки выполняют из стали 20, а удлинитель из стали 45. Коронку с удлинителем соединяют пайкой припоем ПОС-40 (ГОСТ 1499—70). После напайки сегментов при равномерном вращении коронки алмазы вскрывают абразивным кругом. Длина удлинителя может быть различной в зависимости от глубины обрабатываемых отверстий.

Алмазоносные сегменты получают прессованием в специальных пресс-формах. Исходным сырьем служат порошки алмазов, наполнитель и связующий материал. Сегменты изготовляют из природных и синтетических алмазов зернистостью от 630/500 до 160/125.

Наполнителем служат порошки твердых сплавов, связкой — медь. Размеры сегментов, их количество и расход алмазов (при $K = 100\%$) для сверл разных диаметров приведены в табл. 4.16.

Число сегментов оказывает значительное влияние на эффективность сверления и связано с длиной алмазоносных сегментов и диаметром инструмента. При этом необходимо обеспечить такое соотношение между длиной активной части и всей длиной окружности кольцевого торца сверла, которое бы дало наибольшую производительность при наименьшем расходе алмазов. Исследования показали, например, что для сверла диаметром 60 мм оптимальное число сегментов равно 9 (при длине сегмента 11 мм). Увеличение числа сегментов с 9 до 12 (у сверл диаметром 60 мм) не дает существенного приращения производительности.

Для снижения вибраций и повышения стойкости сегменты целесообразно располагать неравномерно. Это особенно важно при обработке железобетонов и материалов с неравномерной структурой. Рекомендации по расположению сегментов приведены в табл. 4.17, где указаны значения углов α на порядковых номерах сегментов.

Режимы сверления и расход алмазов. В последние годы алмазные сверла все шире применяют при обработке отверстий в деталях из стекла, кварца, стеклопластиков и других аналогичных материалов. Обработка отверстий в стекле

Таблица 4.17

Окружной шаг сегментов, град (см. рис. 4.16)

Число сегментов	α_1	α_2	α_3	α_4	α_5	α_6	α_7	α_8	α_9
3	110	123	127						
4	90	85	90	95					
5	66	72	78	66	78				
6	57	63	57	63	57	63			
7	46	52	58	46	52	58	48		
8	40	46	51	40	46	51	40	46	
9	34	40	46	34	40	46	34	40	46

Таблица 4.18

Коэффициенты и показатели степеней в формулах для расчета подачи, крутящего момента и расхода алмазов при обработке стекла

Марка алмаза	C_s	$C_м$	C_q	x_s	y_s	$x_м$	$z_м$	$u_м$	x_q	y_q	u_q
А	0,0167	0,0055	0,00428	0,95	0,82	1,66	2,7	—0,4	0,6	1,3	—1
АС	0,0146	0,026	0,00064	0,92	0,8	1,67	2,5	—0,12	0,6	1,3	—1

и кварце происходит при скорости резания $v = 2{,}8 \div 5{,}8$ м/с, удельной силе подачи на единицу площади торца сверла $p = 50 \div 60$ кгс/см² и охлаждении водой. Расход воды 1,5—2 л/мин, давление 1,5—2 кгс/см². Игольными сверлами работают при ручной подаче.

Скорость подачи и удельный расход алмазов могут быть определены по эмпирическим зависимостям

$$s = C_s p^{x_s} v^{y_s}; \quad M = C_м p^{x_м} D^{z_м} x^{u_м};$$

$$q = C_q p^{x_q} v^{y_q} D^{z_q} x^{u_q}.$$

Значения коэффициентов и показателей степеней приведены в табл. 4.18.

Шероховатость отверстий, полученных при работе на оптимальных режимах сверлами с природными алмазами зернистостью 160/125 и 250/200, $Ra = 0{,}63 \div 1{,}25$ мкм; сверлами с синтетическими алмазами $Ra = 2{,}5$ мкм. Стекло и другие хрупкие материалы дают сколы и выкрашивания кромок отверстия на выходе инструмента. Во избежание сколов эти материалы сверлят с двух сторон.

О показателях процесса алмазного сверления можно судить по следующему примеру. При обработке технического стекла сверлами диаметром 12 мм с природными алмазами зернистостью А160/125 на связке М1 и 100%-ной концентрацией, при окружной скорости 2,8 м/с и удельной силе подачи 50 кгс/см² скорость внедрения инструмента составляет 1,66 мм/с, а удельный расход алмазов 0,02 мг/г.

Алмазное сверление следует вести на высоких скоростях, применяя специальные станки высокой жесткости с высокими частотами вращения. Могут быть также использованы сверлильные, расточные, фрезерные, токарные, координатно-расточные и другие станки. Кольцевые и трубчатые сверла лучше использовать на станках с гравитационной или принудительной подачей.

При алмазном сверлении бетона, железобетона и других аналогичных материалов основными параметрами процесса являются скорость резания, осевая сила, крутящий момент и скорость сверления. Для разрушения бетона и железобетона нужны сравнительно высокие скорости резания. С повышением скорости резания v скорость внедрения инструмента s увеличивается. Так, для бетона М300

$$s = 30{,}4 v^{0{,}93}.$$

Скорость резания ограничивается главным образом теплостойкостью алмазного зерна. При сверлении бетона М300 с карбонатным наполнителем рекомендуются скорости 3,5—5,5 м/с, для бетона М500 с гранитным наполнителем 1—2,5 м/с.

Меньшие значения скоростей принимают при большой осевой силе, которую следует назначать в соответствии с механическими характеристиками обрабатываемого материала. Увеличение осевой силы приводит к увеличению крутящего момента M и производительности процесса. Так, при скорости резания 2,8 м/с (сверло диаметром 60 мм, алмазные зерна А50, $K = 100\%$) получаем зависимости:

для бетона М300

$$M = 0{,}0085\, p^{1{,}52};$$

для бетона М500

$$M = 0{,}0136 p^{1{,}38}.$$

С увеличением скорости резания крутящий момент уменьшается незначительно, а с увеличением зернистости значительно повышается. При обработке бетона М300 рекомендуются давления $p = 20 \div 35$ кгс/см², для бетона М500 $p = 25 \div 50$ кгс/см². Увеличение давления в зоне резания от 10 до 38 кгс/см² вызывает изменение скорости сверления от 55 до 200 мм/мин по бетону М300 и от 3 до 120 мм/мин по бетону М500 при изменении давления в пределах 10—60 кгс/см².

Увеличение размера алмазных зерен способствует существенному повышению подачи. Для бетона М300 и М500 с ростом зернистости от 250/200 до 630/500 подача практически удваивается. При постоянной осевой силе повышение концентрации алмазов в алмазоносном слое ведет к небольшому снижению скорости сверления и крутящего момента. Меньший износ имеют сверла с концентрацией 100%.

Характерной особенностью обработки железобетона является периодическое перерезание арматуры. Металл, обладая повышенной вязкостью, разрушается иначе, чем бетон. Алмазные зерна замазываются металлом, скорость внедрения инструмента намного снижается, а крутящий момент увеличивается.

При обработке бетона М500 алмазы зашлифовываются, и производительность процесса резко снижается. Это вызывает необходимость чистки рабочей части сверла. При чистке сверла увеличивается шероховатость алмазных зерен и тем самым улучшаются их режущие свойства. При сверление бетона М500 через каждые 0,3—0,5 м длины отверстия следует проводить чистку торца сверла абразивными брусками 63С40СМ1К и 54С40СМ1К в течение 30 с. Чистку можно осуществить также путем ввода в зону резания абразивного порошка вместе с охлаждающей жидкостью. Частицы абразива, попадая в зону резания, производят не только чистку торца сверла, но и разрушают обрабатываемый материал. При обработке железобетона с наполнителем высокой прочности (например, гранита) режущая часть сверла в момент перерезания арматуры засаливается металлом значительно быстрее, чем при обработке железобетона с карбонатным наполнителем.

Крутящий момент при работе кольцевыми алмазными сверлами можно рассчитать по формуле

$$M = 5 \cdot 10^{-3} P_0 D_1 F K_v K_x, \qquad (4.3)$$

где $P_0 = CP^x$ — удельная окружная сила резания на среднем диаметре сверла, кгс/см²; D_1 — средний диаметр сверла; F — площадь кольцевого торца режущей части; K_v и K_x — поправочные коэффициенты, учитывающие изменение скорости резания и размера зерен алмазов, значения которых приведены ниже.

Скорость резания, м/с	1	2	2,8	4	5
K_v	1,16	1,04	1	0,96	0,93
Размер зерна, мкм	А200/160	А250/200	А320/250	А500/400	А630/500
K_x	0,87	0,9	0,94	1	1,03

Для бетона М300 опытным путем получено $P_0 = 0{,}095P^{1,52}$, а для бетона М500 $P_0 = 0{,}13P^{1,38}$.

У алмазных сегментных сверл режущие сегменты чередуются с перемычками корпуса коронки, не принимающими участия в резании. По мере износа сегментов происходит равномерное истирание и перемычек, при этом трение пропорционально площади торцов перемычек $F_т$ (см²).

Крутящий момент, приложенный к сверлу, складывается из момента, затраченного на активное резание, и момента на трение перемычек об обрабатываемый материал:

$$M = 5 \cdot 10^{-3} D_1 (P_0 F K_v K_x + P_т F_т),$$

где $P_т$ — удельная окружная сила трения перемычек об обрабатываемый материал.

Имея в виду, что $P = CP^x$, получаем

$$M = 5 \cdot 10^{-3} D_1 (CP^x F K_v K_x + P_т F_т). \qquad (4.4)$$

Производительность процесса сверления определяется скоростью внедрения инструмента. Последняя главным образом зависит от осевой силы подачи, скорости резания, размера алмазных зерен, свойств обрабатываемого материала, концентрации алмазов, вида связки, условий охлаждения и промывки.

Ориентировочно для определения скорости проходки (мм/мин) можно воспользоваться экспериментальными зависимостями:

для бетона М300

$$S = 0{,}32p^{0{,}69}v^{0{,}7}x^{0{,}56}K^{-0{,}16};$$

для бетона М500

$$S = 670p^{0{,}013}v^{0{,}82}x^{0{,}41}K^{-0{,}2}.$$

В последние формулы подставляются p в кг/см², v в м/с, K в %, x в мкм.

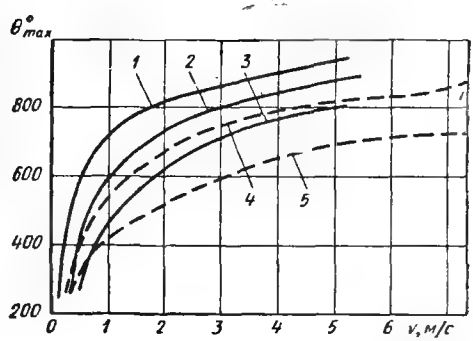


Рис. 4.17. Влияние скорости резания и подачи на температуру процесса сверления бетона М500 — сплошная линия и бетона М300 — штриховая линия (А50 К 100%) при:

1) p =90 кгс/см²; 2) p = 60 кгс/см²; 3) p = =32 кгс/см²; 4) p=60 кгс/см²; 5) p=32 кгс/см²

Температура является одним из важных факторов, определяющих ход процесса резания. Обработка бетона при одинаковых режимах сопровождается разными температурами. На рис. 4.17 приведены температуры при сверлении бетона М500 в виде некоторой области значений, измеренных экспериментально с помощью закладных термопар. Разброс температур возникает главным образом в результате разновысотности алмазных зерен и неравномерности процесса срезания материала.

При обработке бетона М500 температура интенсивно повышается до скорости резания 1—1,5 м/с и достигает 550—780° С. При обработке бетона М300 первоначально температура повышается менее интенсивно, и только при скорости резания 3—4 м/с максимальная температура достигает тех же пределов.

Температуру на торце сверла при обработке бетона можно рассчитать по формуле

$$\theta = cp^x v^y, \tag{4.5}$$

где p — давление инструмента, кгс/см²; v — скорость сверления, м/с.

Значения c, x и y приведены в табл. 4.19.

Существенное влияние на процесс резания и износ инструмента оказывает соотношение коэффициентов теплопроводности зерна и связки. При связках с низким коэффициентом теплопроводности происходит значительное накопление тепла в сверле, что может привести к разрушению алмаза. Желательно обеспечить коэффициенты теплопроводности связок, близкие к коэффициенту теплопроводности режущих зерен.

Таблица 4.19

Значения коэффициента и показателей степени в формуле (4.5)

Обрабатываемый материал	Диапазон скоростей, м/с	c	x	y
Бетон М300	0,5—1,5 Св. 1,5—8	135 153	0,32 0,32	0,22 0,23
Бетон М500	0,5—1,5 Св. 1,5—5,5	92 289	0,46 0,20	0,39 0,19

Пользуясь экспериментальными формулами, можно определить область практически рекомендуемых режимов работы, основанных на безопасном нагреве алмазного зерна. Так, приняв предельную температуру зерна 800° С и учтя возможную неравномерность процесса коэффициентом 0,7 (запас по температуре 30 %), получим:

для бетона М500

$$800 \cdot 0{,}7 = 92p^{0,46}v^{0,39},$$

откуда

$$p = \frac{44{,}2}{v^{0,85}}. \qquad (4.6)$$

При скорости сверления 1 м/с получим предельное давление инструмента 44,2 кгс/см².

Практически режимы сверления бетона целесообразно выбрать в следующих пределах:

для М300

$$p = 20 \div 35 \text{ кгс/см}^2; \quad v = 3{,}5 \div 5 \text{ м/с};$$

для М500

$$p = 25 \div 50 \text{ кгс/см}^2; \quad v = 1 \div 2{,}5 \text{ м/с}.$$

Для охлаждения инструмента требуется 0,2 л/мин воды на квадратный сантиметр активного торца сверла. Однако для удаления шлама такого расхода недостаточно, поэтому его необходимо увеличить до 0,3—0,6 л/мин на 1 см² торца сверла.

Ультразвуковое сверление неметаллических материалов. При обработке деталей из минералокерамики, ситаллов, технического, кварцевого и оптического стекла, рубина часто встречается сложная и трудоемкая операция — сверление отверстий небольшого диаметра. Эффективность алмазного сверления при сообщении инструменту ультразвуковых колебаний малой амплитуды в ряде случаев повышается в 8—10 раз. При воздействии ультразвуковых колебаний на образец в зоне контакта индентора с материалом на поверхности последнего образуется зона повышенного трещинообразования — зона предразрушения. Обработка такой зоны значительно облегчается.

Производительность сверления отверстий диаметром 3—10 мм зависит от режимов резания, характеристики инструмента, глубины отверстия, свойств обрабатываемого материала и акустических параметров колебаний.

Осевая сила зависит от свойств обрабатываемого материала, площади инструмента и незначительно от амплитуды колебаний инструмента. С увеличением твердости детали увеличивается давление, оказываемое инструментом. Например, для кварцевого стекла оптимальное давление равно 31,2 кгс/см², а для минералокерамики — 39,2 кгс/см² и давление возрастает от 31,2 кгс/см² у инструмента площадью рабочей части активного торца 19,6 мм² (диаметром 6 мм) до 39,5 кгс/см² при использовании инструмента с меньшей площадью работающей части торца 6,4 мм² (диаметром 3 мм), т. е. примерно на 25%.

Изменение амплитуды колебаний в диапазоне 6—12 мкм мало влияет на осевую силу. Частота колебаний инструмента в пределах 25—50 кГц также практически не оказывает влияния на осевую нагрузку. Рекомендуемые давления для сверл диаметром 6 мм приведены в табл. 4.20. Для отверстий диаметром 3 мм сила должна быть повышена на 20—25%.

При ультразвуковом алмазном сверлении желательно применять максимальную возможную частоту вращения инструмента. Снижение скорости вызывает уменьшение производительности и увеличение удельного износа инструмента.

Зависимость подачи от частоты вращения сверла ($n = 900 \div 2500$ об/мин) имеет вид

$$s = 1{,}55n^{0,45}.$$

Рекомендуемые значения давления инструмента на деталь при алмазном ультразвуковом сверлении

Обрабатываемый материал	Давление, кгс/см²	Обрабатываемый материал	Давление, кгс/см²
Керсил	18—22	Стеклокварц	30—32
Ниасит	20—25	Термосил	30—32
Силицированный графит ПГ-50С	24—26	Ситалл:	
Стекло:		ЛЗ-40	32—35
техническое	27—30	СТБ-1	33—36
ЛФ-5	27—30	СТЛ-10	37—39
К-8	30—32	Минералокерамика ЦМ-332	38—40
ТФ-3	30—32	Рубин синтетический	39—42
кварцевое	30—32		

Производительность процесса повышается с увеличением амплитуды колебаний A и оказывается наибольшей при отношении двойной амплитуды к среднему размеру зерна, примерно равном 0,15. Максимальной производительности соответствует минимальный расход алмазов. При больших амплитудах колебаний часто наблюдается разрушение алмазных коронок из-за высоких циклических напряжений. Производительность повышается примерно на 40% с увеличением частоты колебаний (от 25 до 45 кГц), при этом удельный расход инструмента интенсивно увеличивается (в 3—4 раза).

С увеличением концентрации алмазов от 50 до 150% производительность процесса значительно повышается, а удельный расход алмазов практически не изменяется. Дальнейшее увеличение концентрации до 200% ведет к снижению производительности процесса и резкому увеличению износа, что объясняется значительным уменьшением прочности алмазного слоя инструмента. При ультразвуковом сверлении рекомендуются концентрации $K = 100 \div 150\%$.

Для сверления стекла применяют инструменты со связкой М1, которые имеют высокую твердость и ударную вязкость; такие инструменты можно использовать при больших окружных скоростях и усилиях подачи.

Давление воды, подводимой в процессе сверления, оказывает существенное влияние на производительность процесса и износ инструмента. При давлении 1,5 кгс/см² износ имеет максимальное значение, а производительность — минимальное. С увеличением давления производительность увеличивается, а износ снижается. При давлении 2,5—3,5 кгс/см² процесс резания стабилизируется. Расход воды равен 0,5—0,7 л/мин.

Ультразвуковая алмазная обработка имеет некоторые преимущества перед ультразвуковой обработкой свободным абразивом. Производительность сверления алмазным инструментом выше в 30—50 раз, а расход инструмента в 10—25 раз ниже. Глубина отверстия при ультразвуковой алмазной обработке может быть значительно увеличена.

Обрабатываемость хрупких неметаллических материалов при ультразвуковом сверлении зависит от их прочности, структуры и соотношения микротвердостей алмаза и материала.

Показатели обрабатываемости таких материалов представлены в табл. 4.21.

Данные в табл. 4.21 приведены для сверла диаметром 6 мм (внутренний диаметр 4 мм) с металлической связкой М5-10, при концентрации алмазов 150%, зернистости 160/125; частота вращения сверла 2420 об/мин, амплитуда колебаний инструмента 10 мкм, частота колебаний 43,5 кГц, удельная сила подачи 30 кгс/см². Относительная обрабатываемость оценивалась коэффициентом $K_s = s/s_1$, где s — производительность обработки исследуемого материала; s_1 — производительность сверления оптического стекла К8, принятого за эталон ($K_s = 1$).

Таблица 4.21

Обрабатываемость различных материалов ультразвуковым алмазным сверлением

Обрабатываемый материал	Подача s, мм/мин	Производительность, мм³/мин	Коэффициент обрабатываемости K_s	Износ, карат/м	Коэффициент износа	Шероховатость R_z, мкм	Конусность отверстия $\frac{\Delta D}{h}$
Стекло:							
К8	79,2	1731	1	0,102	1		3—4
техническое	102	2210	1,29	0,017	0,17		5—6
ЛФ5	101	2207	1,28	0,085	0,86		2—4
ТФ-3	70,2	1534	0,88	0,106	1,01		5—6
кварцевое	78,1	1751	0,99	0,058	0,58	20—40	4—4,5
Стеклокварц	77,8	1700	0,98	0,088	0,86		3—4
Технический фарфор	80,9	1768	1,01	0,033	0,32		3—4
Рубин синтетический	12	263	0,15	0,678	6,75		7
Ситалл:							
СТБ-1	62,3	1359	0,78	0,134	1,33		2—4
жаропрочный	56,9	1241	0,72	0,118	1,17		1—2
ЛЗ-40	52,2	1140	0,66	0,048	0,47		3—6
СТЛ-10	20,4	444	0,26	0,194	1,93	10—20	2—3
Минералокерамика ЦМ-332	20,9	456	0,29	0,242	2,4		6—8

§ 4.4. Обработка неметаллических материалов

В современном машиностроении, приборостроении, электротехнической, радиотехнической, электронной и других отраслях промышленности широкое применение находят пластмассы, стекло, керамика, фарфор, кварц, кремний, германий и другие неметаллические материалы, обработку которых производят, как правило, абразивными и алмазными инструментами.

Обработка стекла. Обработку деталей из технического и оптического стекла производят кругами различных форм и характеристик и свободным абразивом. В табл. 4.22 приведены рекомендации по выбору марок и зернистостей алмазов для выполнения основных операций механической обработки стекла.

Исследованиями установлено, что наиболее рациональными связками и концентрациями при обработке стекла соответственно являются: для резки кругами АОК—МО4, 25%; для распиловки полосовыми пилами МЖ—МО3, 75—100%; для распиловки кругами АПС—Ж, 50—100%; для глубокого шлифования кругами АК и АЧК—МО4 и МО7, 25—50%; для тонкого шлифования таблеточным инструментом МО15—МЖ, 10—12,5%.

Для обработки стекла применяют и другие связки. Если принять стоимость обработки стекла инструментом на связке М1 за 100%, то стоимость обработки кругами на других связках соответственно будет: МТ—56%, МО4—60%, МЖ—71%, Ж1—71%, М3—84%, С22—87%, МСК—105%, МС6—112% и МО13—116%.

При резке стекла лучшими являются связки МО3 и МЖ, которые в сравнении с другими связками обладают рядом преимуществ (табл. 4.23) [116].

Данные табл. 4.23 получены при скорости резки стекла 25—35 м/с кругом АСК100/80 25%.

Шлифование и резку стекла производят обычно со скоростями круга $v = 10 \div 15$ м/с и продольными подачами $s = 1 \div 5$ м/мин. В отдельных случаях (шлифование некоторых марок оптического стекла, сферошлифование заготовок диаметром 100 мм и более) скорость круга необходимо увеличивать до 30—35 м/с.

Алмазную обработку стекла производят с охлаждением. В качестве СОЖ используют водные растворы эмульсола Эмус (3—5%-ный раствор), НГЛ-205 (5%-ный раствор), состав, содержащий 6% эмульсола, 8% керосина и 80% воды и другие виды СОЖ, подаваемые в зону обработки с расходом 10—20 л/мин.

Таблица 4.22

Выбор марки, зернистости алмазов и формы кругов при обработке стекла

Зернистость алмазного порошка	Резка	Сверление	Сферошлифование	Плоское шлифование	Круглое шлифование	Фасонное шлифование	Шлифование больших поверхностей	Центрирование	Обработка автомобильных стекол	Обработка фацета	Нанесение алмазной грани	Шлифование краев вращающихся деталей	Тонкое шлифование	Фасетирование
630/500	АСК, АСС / Круги форм АСК, АПС	АСК, АСС / Круги форм АС	АСВ, АСК / Круги форм АК, АЧК, сегментные	АСВ, АСК, АСС / Круги форм АЧК, сегментные	АСВ / Круги форм АПП	АСВ, АСК / Круги специальной формы	АСВ, АСК / Круги специальной формы	АСО, АСВ / Круги форм АПП	АСВ / Круги форм А6П	АСВ, АСК / Круги форм АЧК	АСВ / Круги форм А2П	АСМ, АСВ / Круги форм АПП	АСН / Круги форм АК, таблетки	АСМ / Круги форм АПП, АСШ
500/400														
400/315														
315/250														
250/200														
200/160														
160/125														
125/100														
100/80														
80/63														
63/60														
50/40														
40/28														
28/20														
20/14														
14/10														
10/7														

Таблица 4.23

Показатели при резке стекла кругами на разных связках

Связка	Удельный расход, карат/м²	Потребляемая мощность, кВт	Сколы на обработанных кромках, мм	Связка	Удельный расход, карат/м²	Потребляемая мощность, кВт	Сколы на обработанных кромках, мм
МО3	0,56	0,35	0,30	М1	1,35	0,38	0,38
МО4	2,84	0,25	0,28	МН1	0,37	0,35	0,31
МО7	1,10	0,40	0,50	Ж	0,88	0,33	0,33
МО15	0,83	0,40	0,41				

Обработка пластмасс. Для резки пластмасс применяют абразивные круги из карбида кремния или электрокорунда зернистостью 40—63, на бакелитовой и вулканитовой связках со структурой № 8, твердостью СТ. Оптимальная скорость резания составляет 40—60 м/с. Реактопласты можно обрабатывать без охлаждения и с охлаждением, термопласты только с охлаждением.

Шероховатость поверхности реза не зависит от связки и почти не зависит от зернистости круга. Однако тип связки оказывает существенное влияние на энергоемкость и количество выделяющегося тепла. При работе кругами на вулканитовой связке наблюдается высокая энергоемкость и выделение большого количества, тепла, поэтому во избежание прижогов приходится работать с охлаждением или переходить на круги с бакелитовой связкой. При этом силы резания снижаются на 25—30%, а производительность возрастает в 4—5 раз.

Работы японских ученых показали, что при резании абразивными кругами пластамасс без охлаждения под влиянием выделяющегося тепла на зернах возможно образование нароста. Для устранения этого недостатка предложены круги, средняя часть которых (обычная композиционная смесь абразив-бакелит) заключена между двумя пластинами из фольги. На фольге и абразивной части круга выштампованы сетчатые (вафельные) рельефы. Благодаря такой конструкции уменьшается трение круга о пластмассу и улучшается теплоотвод от его рабочей части.

Разрезку слоистого фенопласта на бумажной основе толщиной до 10 мм ведут без охлаждения, при попутной подаче; скорость резания 50 м/с, продольная подача 0,7—0,8 м/мин, сила подачи до 1,5—2,0 кгс.

Трудности шлифования пластмасс заключаются в том, что термопласты в отличие от реактопластов в процессе обработки засаливают инструмент. Для устранения этого недостатка рекомендуются абразивные круги средней мягкости с открытой структурой (9—12). Шлифование необходимо вести с обильным охлаждением. При плоском шлифовании литых, прессованных и слоистых пластмасс рекомендуются круги из электрокорунда, а для бесцентрового шлифования — из карбида кремния; зернистость та же, что и для резки.

Трудоемкой операцией механической обработки пластмасс является их разрезка на заготовки заданных размеров. Разрезка этих материалов традиционным твердосплавным или абразивным инструментами приводит к образованию большого количества отходов и не обеспечивает необходимого качества поверхности. При разрезке пластмасс алмазными отрезными кругами производительность в 1,5—5,0 раз превышает производительность, достигаемую при работе твердосплавной фрезой. Стойкость алмазного круга в зависимости от конструкции превышает стойкость твердосплавной фрезы в 35—50 раз (с учетом возможных переточек).

На долговечность алмазного инструмента существенное влияние оказывает направление подачи обрабатываемого материала. Так, при встречной разрезке по сравнению с попутной производительность увеличивается в 1,5 раза, а износ инструмента снижается в 1,5—2,0 раза. С точки зрения получения максимальной производительности, разрезку пластмасс лучше вести последовательными проходами с небольшой глубиной резания. Однако качество поверхности при этом

Таблица 4.24

Качество обработки при резании стеклотекстолита

Режимы резания			Высота микронеровностей Rz, мкм	Режимы резания			Высота микронеровностей Rz, мкм
Скорость резания v, м/с	Подача s, м/мин	Глубина резания t, мм		Скорость резания v, м/с	Подача s, м/мин	Глубина резания t, мм	
13—15	1,0	5,0	22,5	–	1,0	10	15,5
20—25			18,5			15	16,0
30—35			17,0			20	16,5
40—45			15,5			25	17,0
40—45	2,0		16,5	40—45		30	17,5
	3,0		20,0				
	4,0		22,5				
	5,0		24,0				

несколько ухудшается в зависимости от состояния СПИД, рабочей поверхности инструмента и обрабатываемого материала.

При разрезке пластмасс алмазными пилами со сплошным ободом (АОК) шероховатость поверхности реза на всех режимах обычно соответствует $Ra = 25 \div 1{,}25$ мкм. С этой точки зрения интересны работы по резанию стеклотекстолита отрезными дисковыми пилами из синтетических поликристаллических дробленых алмазов типа баллас (АСБ). Результаты исследования разрезки стеклотекстолита кругами АОК 250×2×5×32, АСБ400/315М1 100%, по данным В. И. Дрожжина, приведены в табл. 4.24.

Для разрезки стеклопластиков и плит из пенопласта ПХВ, облицованного бумажным слоистым пакетником, применяют пилы диаметром 320 мм, оснащенные алмазами АСВ400/315. Стойкость пил равна 120—155 м² реза. Аналогичные данные получены при разрезке этих материалов алмазными пилами на гальванической связке. Вследствие специфического характера закрепления алмазных зерен на рабочей поверхности, дисковые пилы на гальванической связке имеют меньший коэффициент трения связки об обрабатываемый материал и соответственно меньше нагреваются. Диаметр пил равен 100—400 мм, зернистость 315/250 — 400/315. Наиболее экономичный режим обеспечивается при подаче 4—6 м/мин и скорости резания 60—70 м/с.

Исследованиями установлено, что при резании стеклопластика отрезными кругами диаметром 100—400 мм, с корпусом толщиной 0,7—2,5 мм при скорости круга 40—60 м/с и продольной подаче 0,2—5,0 м/мин наименьшая себестоимость обработки имела место при концентрации алмазов 75—100%, зернистости 315/250—400/315, связках М1, М3 и Е1. При этом производительность обработки достигала 300—500 см³/мин при шероховатости поверхности $Ra = 25 \div 1{,}25$ мкм (без следов расслоения и мшистости).

На стойкость инструмента и качество обработки пластмасс существенное влияние оказывают температуры резания. При резании стеклопластиков дисковыми пилами АОК диаметром 200 мм и с характеристикой АСВ200/160 М1 50% на глубину 10 мм без охлаждения установлено, что температура резания зависит от вылета (выступания) зерен над связкой (при выступании зерен на 5 мкм температура резания составляет 425° С, а при 50 мкм только 190° С), от величины подачи (при $s = 0{,}5$ м/мин температура равна 150° С, а при $s = 4$ м/мин 300° С), от скорости резания (при $v = 20$ м/с; $s = 2$ м/мин температура резания равна 300° С, а при $v = 70$ м/с 260° С), от зернистости, особенно в диапазоне 63/50—200/160 (по мере увеличения зерна температура снижается), от марки алмазов (при работе алмазами АСР температура выше, чем при работе алмазами АСВ и АСК).

Листовой шлакоситалл наиболее рационально обрабатывать отрезными алмазными кругами диаметром до 400 мм, зернистостью 315/250, на связке М1, с концентрацией 50%, при скорости круга 60 м/с, продольной подаче 500 мм/мин,

глубине резания (толщине листа) 8—9 мм, с использованием в качестве СОЖ проточной воды. При прочности шлакоситалла 400—500 кгс/см² удельный расход алмазов равен (0,3—1,2) 10^{-2} мг/см² и потребляемая мощность 0,8—1,3 кВт, при прочности 1100—1250 кгс/см² соответственно $5{,}5 \cdot 10^{-2}$ мг/см² и 3,1—3,6 кВт [77].

Алмазные круги эффективно используют [33] для резки тормозных накладок для автомобилей, изготовляемых из асбокаучуковой массы (*HRB* 17—20) методом прессования и вулканизации. Наиболее перспективными оказались алмазные отрезные сегментные круги типа АОСК, стойкость которых превосходит стойкость абразивных кругов в 1200 раз. Круги АОСК работают со скоростями до 50 м/с и продольными подачами до 2,3 м/мин (повышение подач приводит к образованию заусенцев на кромках детали).

В автомобильной, вагоностроительной и других отраслях промышленности широко распространены полимерные лакокрасочные покрытия. Для придания лакированным поверхностям зеркального блеска их шлифуют и полируют, при этом устраняются дефекты пленки, возникшие в процессе ее нанесения, сушки и полимеризации (пузыри, потеки, шагрень и др.). При шлифовании микронеровности срезаются абразивными зернами и сглаживаются вследствие высокой температуры, возникающей при трении инструмента об обрабатываемую поверхность. В тех случаях, когда обработку ведут с применением жидкостей, происходит частичное растворение и перераспределение материала лаковой пленки. Если обработку поверхности ведут в несколько этапов, то сначала выполняют влажное шлифование, а затем гладкую матовую поверхность полируют (табл. 4.25).

Шеллаковые и нитролаковые покрытия полируют с использованием жидких или твердых (брикетных) полировальных паст. Жидкую полировальную пасту наносят на полируемую поверхность, твердую — на полирующий инструмент. Полирование можно выполнять барабанами, фетровыми лентами и тканевыми дисками. Особенно широкое распространение получили полировальные барабаны, набранные из тканевых полировальных дисков.

Обработка керамики. Подложки интегральных схем в радио- и электронной промышленности изготовляют из высокоглиноземистой керамики. Весьма высокие требования к качеству изготовления подложек (точность в пределах 1—2 мкм, шероховатость $Ra = 0{,}1 \div 0{,}025$ мкм, отсутствие трещин и сколов) обеспечиваются при прецизионном алмазном шлифовании кругами формы АЧК с алмазами марки АСВ зернистостью 50/63—80/63 (предварительный проход) и 3/2—10/7 (окончательный проход) на связках М1, МО12, К16, МО6, МО8 с концентрацией 100%. Рекомендуемый режим шлифования: глубина резания 5 мкм, скорость круга 35 м/с, частота вращения стола 35 об/мин. При приведенных условиях обработки высота микронеровностей *Ra* описывается следующим уравнением:

$$Ra = 0{,}0132d - 0{,}00007d^2,$$

где d — размер зерна в алмазном инструменте. Производительность обработки кругами АСВ80/63М08 100% соответствует 57 мм³/мин, кругами АСВ10/7М08 100% 17 м³/мин.

Изделия из спеченной корундовой керамики находят широкое применение в технике в связи с исключительными физико-механическими, диэлектрическими и термическими свойствами, в значительной степени не изменяющимися при высоких температурах. Высокие твердость (*HRA* 92—94), хрупкость, и абразивность и низкая теплопроводность осложняют механическую обработку спеченной керамики. Исследованиями установлено, что круглое шлифование этого материала следует производить алмазными кругами АПП из природных алмазов на связках М1 (предварительно) и Б1 (окончательно) с концентрацией 100%. Режим шлифования рекомендуется следующий: скорость круга 25—30 м/с, скорость детали 70—100 м/мин, продольная подача 0,7—0,8 м/мин, глубина шлифования 0,005 мм/дв. ход. При предварительной обработке (зернистость 125/100) обеспечивается шероховатость $Ra = 0{,}32 \div 1{,}25$ мкм, при окончательной (зернистость 63/50) $Ra = 0{,}16 \div 0{,}32$ мкм.

Таблица 4.25

Технологические данные по обработке лакокрасочных покрытий (температура воздуха в помещении не ниже 18° С)

Оборудование, инструмент и параметры процесса	Шлифование			Полирование нитролаковых покрытий
	сухое нитроцеллюлозных шпатлевочных покрытий	влажное нитроцеллюлозных эмалевых покрытий	влажное прозрачных нитролаковых покрытий	
Твердость пленки, определяемая маятниковым прибором М-3	0,30—0,35	0,35—0,40	Не ниже 0,35	Не ниже 0,35
Шкурка шлифовальная	На бумажной основе № 4—3	На бумажной основе № 5, 4, 3 или стеклолаковой основе № 6, 4, М40		Войлочные или матерчатые круги с пастами № 290, Циклон-20, Циклон-25
Оборудование для шлифования: больших поверхностей	Станки типа ШЛПС или ШЛ 2В	Станки типа ШЛПС с приспособлением для увлажнения		Станки плоскополировальные типа ПП-2, ППА-3
небольших поверхностей	Вибромашины типа 11, ППМ-1, ПМ-6 и др.			
Относительная влажность воздуха, %	50—65		55—70	—
Скорость резания, м/с	14—16		10—15	15—25
Удельное давление ленты на деталь, кгс/см²	0,04—0,05		—	—
Скорость подачи детали, м/мин	2—3 *		—	—
Удаление пыли после шлифования	Волосяная щетка с отсосом пыли	Мягкая хлопчатобумажная ткань		—

* Направление шлифования необходимо периодически менять на 180° (например, поворачивая деталь).

Спеченную керамику следует разрезать отрезными кругами на металлических связках с концентрацией 100%, зернистостью 200/160—250/200 (скорость круга 45 м/с, с охлаждением 3%-ным раствором кальцинированной соды), при этом обеспечивается производительность до 8—10 см²/мин и шероховатость обработки $Ra = 1{,}25$ мкм [41].

Круглое наружное шлифование корундовой керамики целесообразно производить кругами АПП с характеристикой АСО125/100 Б1 50% (предварительное шлифование) и АСМ40/28Б3 50% (окончательное шлифование). При предварительном шлифовании рекомендуется следующий режим обработки: $v = 30$ м/с; $v_1 = 20$ м/мин; $t = 0{,}05$ мм, а при окончательном $v = 30$ м/с; $v_1 = 5$ м/мин; $t = 0{,}01$ мм.

Перспективным является скоростное алмазное шлифование керамики. Исследования, проведенные при скорости круга от 16 до 123 м/с, показали, что при использовании кругов АСВ63/50МО4 100% и АСВ100/80МС6 100% наиболее рациональной оказывается скорость 60 м/с, при которой съем материала повышается с 2 до 9 см³/мин (при повышении давления в контакте круг—деталь от 1 кгс/см² до 5 кгс/см²), а высота микронеровностей равна 0,65—1,25 мкм.

Обработка полупроводниковых материалов. Заготовки полупроводниковых монокристаллов в зависимости от их назначения могут иметь различную форму и массу. В качестве сырья используют кварц, германий, кремний и другие материалы, характерной чертой которых являются высокие твердость и хрупкость, поэтому основными инструментами для разрезки являются алмазные дисковые пилы и штрипсы. Заготовку-слиток приклеивают к прокладке (например, стеклу), которая, в свою очередь, приклеивается к столику разрезного станка. В качестве клеящего вещества можно применять смесь воска с канифолью, шеллак, сургуч, мастику, состав которых приведен ниже.

Материал	Состав
Мастика № 27	0,5 кг канифоли; 0,2 кг лака; 0,2 кг мела; 0,2 кг окиси алюминия
Мастика № 38	0,2 кг канифоли; 0,1 кг смолы; 0,4 кг шеллака; 0,2 кг мела; 0,2 кг окиси алюминия
Гипсовая мастика	0,8 кг канифоли; 0,1 кг воска; 0,3 кг окиси алюминия
Шеллачная мастика	0,8 кг канифоли; 0,1 кг воска; 0,2 кг окиси алюминия; 0,1 кг шеллака
Мастика для станков типа КОС-750	1 кг канифоли; 0,25 кг воска; 0,05 кг парафина

При работе штрипсами резание осуществляется вследствие переноса (перекатывания и протаскивания) абразива, подаваемого в зону резания в виде суспензии, состоящей из одной части микроабразива и трех частей воды. Штрипсы изготовляют из бритвенной стали; высота полотна равна 10 мм, толщина ~0,15 мм. Длину и количество штрипсов в инструменте определяют конструкцией станка и размерами пластин, которые необходимо получить после разрезки.

Разрезка кремния при прочих равных условиях идет более интенсивно по мере увеличения силы подачи; так, при нагрузке в 1 кгс скорость внедрения инструмента равна 0,18—0,20 м/мин, а при нагрузке в 5 кгс, 0,3—0,35 мм/мин. В начальные моменты резания, когда штрипсы особенно легко теряют устойчивость, сила подачи должна быть в 2 раза меньше, чем в процессе пиления.

Для распиловки кристаллов на пластины успешно используют алмазные полосовые пилы на гальванической связке. Размеры полотна пилы: толщина 0,1 мм, длина 300 мм, высота 7 мм, зернистость 315/250. При работе пилами АКВР ширина реза не превышает 0,22 мм. При зернистости алмаза 315/250 шероховатость обработанной поверхности соответствует $Ra = 0{,}32 \div 1{,}25$ мкм. В качестве СОЖ применяют 3—5%-ный раствор кальцинированной соды в воде. Стойкость круга равна 2600—2700 пластин из кремния.

Шлифование полупроводниковых пластин можно выполнять свободным абразивом с чугунным или стеклянным шлифовальником. В качестве абразива применяют микропорошки размером зерен не более 15 мкм. Обработку выполняют в несколько стадий: грубое шлифование (зернистость 10—14 мкм), тонкое шлифование (зернистость 5—7 мкм) и лощение (зернистость до 3 мкм).

Исследованиями установлены следующие эмпирические зависимости для процесса шлифования кремниевых пластин алмазными кругами АЧК 80×3×3×20 АСМ40/28МО12 100% в диапазоне скоростей $v = 47 \div 72$ м/с; $v_1 = 10 \div 50$ мкм/мин и $n = 2 \div 8$ об/мин:

$$P_z = 0{,}04 n^{0{,}46} v^{-0{,}37} v_1^{1{,}20}; \quad P_y = 0{,}22 n^{0{,}12} v^{-0{,}30} v_1^{1{,}77};$$

$$P_x = 0{,}06 n^{0{,}19} v^{-0{,}54} v_1^{0{,}90}; \quad N = 5{,}60 n^{0{,}06} v^{0{,}70} v_1^{1{,}25}.$$

Шлифование деталей из кварца обычно выполняют при скорости резания 30 м/с, продольной подаче 15—18 м/мин, поперечной подаче 0,5—1,5 мм/дв. ход

и глубине резания 0,06—0,07 мм. Для притирки плоских поверхностей деталей из кварца используют алмазные пасты АСМ28/20—20/14, при этом производительность равна 300—500 шт./ч (16×16 мм).

Для придания деталям сферической формы используют алмазные трубчатые круги типа АТК и алмазные кольца АК диаметром от 14 до 200 мм с толщиной алмазного слоя 2—5 мм, высотой 3—5 мм. Алмазные кольца обычно выпускают на связках М1 и МЖ, зернистостью 40/20—14/10, тип алмазов АСМ (природные и синтетические).

Механическое полирование подложек из кремния, германия, титана стронция проводят на фторопластовом круге с корундовыми или алмазными пастами. Размер зерен основной фракции абразива ~1 мкм. Длительность процесса грубого полирования равна 1 ч. Полирование полупроводников делят на две разновидности: оптическую, выполняемую окисью хрома, церия или других редкоземельных элементов, применяемых в оптической промышленности, и металлографическую, выполняемую путем нанесения алмазной пасты с размером зерен основной фракции ~0,25 мкм или окиси алюминия той же зернистости на силоновый, нейлоновый или другой аналогичный по жесткости и стойкости материала полировальный круг.

Глава 5

ТОЧЕНИЕ И ФРЕЗЕРОВАНИЕ АЛМАЗОМ, ЭЛЬБОРОМ-Р И ДРУГИМИ СВЕРХТВЕРДЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

§ 5.1. Геометрия режущих кромок и конструкции резцов и фрез

Алмазные и эльборовые лезвийные инструменты позволяют обрабатывать различные по свойствам материалы (закаленные стали и чугуны, цветные и титановые сплавы, золото, серебро, неметаллические материалы) и получать изделия высоких классов точности и шероховатости. Особенно эффективно применение этих резцов и фрез на станках со сменными наладками, станках с ЧПУ и автоматах в крупносерийном и массовом производстве, где высокая стойкость инструмента из алмаза, эльбора и других сверхтвердых материалов позволяет резко сократить количество наладок и повысить однородность продукции.

В табл. 1.10 приведены самые общие рекомендации по областям применения современных сверхтвердых материалов, в том числе и при лезвийной обработке.

Геометрические параметры алмазных резцов (рис. 5.1) приведены в табл. 5.1, где, кроме значений углов (переднего γ, главного заднего α, углов в плане φ, φ_1, φ_0, φ_1' и угла наклона главной режущей кромки λ), показаны варианты оформления вершины резца, нашедшие применение в производстве (I — радиусная, II — однофасеточная, III — многофасеточная).

При выборе углов резца для других обрабатываемых материалов целесообразно руководствоваться следующими соображениями: а) хрупкость алмаза требует придания режущему инструменту возможно большего угла заострения (не менее 80—85°) и возможно более прочной формы; б) желательно применение небольших вспомогательных углов в плане (до 0°), так как это способствует повышению прочности резца и снижению шероховатости обработанной поверхности; в) при больших углах в плане, особенно в случае, когда применяют резцы с $\varphi = \varphi_1 = 45 \div 50°$, необходимо делать достаточно большой радиус закругления между кромками ($r = 0{,}5 \div 1{,}5$ мм); при этом следует иметь в виду что увеличение радиуса закругления приводит к повышению радиальной силы резания и снижению точности обработки при недостаточно жесткой системе СПИД; чрезмерные радиусы закругления могут быть причиной губительных для алмаза вибраций.

Рекомендуемые геометрические параметры резцов из эльбора-Р при обработке закаленных сталей (*HRC* 50—67) высокопрочных и легированных чугунов и некоторых сплавов приведены в табл. 5.2 [73].

Рекомендации, представленные в табл. 5.2, являются ориентировочными и требуют уточнения при обработке конкретных материалов. Так, например, при точении стали 30ХГСНА (*HRC* 44—46) значительно повышается стойкость резцов из эльбора-Р и уменьшается их размерный износ при увеличении угла α до 20—25°.

При чистовом точении углеродистых, легированных конструкционных и инструментальных сталей, закаленных до различной твердости, резцами из композита [46] рекомендуются большие задние углы α. При точении закаленной стали 40ХН2СМА (*HRC* 49—50) увеличение заднего угла с 10 до 25° приводит к повышению стойкости резца в 2—2,5 раза, а стали ШХ15 (*HRC* 64) в 5—6 раз.

Повышение режущей способности резцов из композита с увеличением заднего угла связано со спецификой распределения удельных контактных нагрузок под задней поверхностью инструмента при обработке с малыми толщи-

Таблица 5.1

Геометрические параметры алмазных резцов (см. рис. 5.1)

Материал обрабатываемой детали	Марка алмаза *	Углы резца, град ($\lambda = 0$)					Оформление вершины		
		γ	α	φ	$\varphi_0 = \varphi_1'$	φ_1	Форма заточки	l, мм	r, мм
Медь М1	А	0	6—10	45	0—0° 30′	45	*I—III*	0,1—0,3	0,2—0,5
	АСП	+3—(+5)	6—10	40	0	40	*I—III*	0,2—0,4	0,2—0,5
Бронза оловянистая	А	0—(—5)	4—10	45	0—0° 30′	45	*III*	—	0,2—0,5
	АСП	+3—(+5)	6—10	40	0	40	*III*	—	0,2—0,5
Латунь Л62	А	0—(—5)	6—10	45	0—0° 30′	45	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,5
	АСП	0—(+5)	10—12	40	0	40	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,5
Баббит	А	0	10—12	45	0—0° 30′	45	*I—III*	0,1—0,3	0,2—0,8
	АСП	+5	10—12	40	0—0° 30′	40	*I—III*	0,1—0,3	0,2—0,8
Алюминий	А	0	6—12	45	0—0° 30′	45	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,5
	АСП	0	6—12	40	0	40	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,5
Дюралюминий Д16Т	А	0—(—3)	8—10	45	0—0° 30′	45	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,5
	АСП	0	10—12	40	0	40	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,5
Оргстекло	А	0	10—12	45	0—0° 30′	45	*I—III*	0,1—0,3	0,2—0,8
	АСП	+5	10—12	40	0—0° 30′	40	*I—III*	0,1—0,3	0,2—0,8
Гетинакс	А	0	8—12	45	0—1	45	*I—III*	0,2—0,4	0,2—0,8
	АСП	0	10—12	40	0—1	40	*I—III*	0,2—0,4	0,2—0,8
Стеклотекстолит СТ	А	0—(—5)	10—12	45	0—1	45	*I—III*	0,2—0,5	—
	АСП	10—(5)	10—14	40	0—1	40	*I—II*	0,2—0,5	—
Стеклопластик СВАМ	А	0—(—5)	10—12	45	0—1	45	*I—II*	0,2—0,5	—
	АСП	0—(—5)	10—14	40	0—1	40	*I—II*	0,2—0,5	—
Пластическая керамика	А	0—(—5)	10—12	45	0	45	*I—II*	0,1—0,5	—
	АСП	0	10—14	40	0	40	*I—II*	0,1—0,5	—
Титановый сплав	А	(—3)—(—8)	6—8	45	0—0° 30′	45	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,8
	АСП	0—(—5)	6—8	40	0	40	*I—III*	0,2—0,3	0,2—0,8

* А — алмаз природный; АСП — алмаз синтетический поликристаллический

Таблица 5.2

Геометрические параметры резцов из эльбора-Р

Тип резца	Углы резца, град					r, мм
	γ	α	ψ	φ_1	λ	
Прямой проходной	—5⊕ ⊕—15	10—20	30—60	5—15	0—10	0,1—1
Подрезной отогнутый	—5⊕ ⊕—10	10—20	90—100	0—5	0—10	0,1—1
Расточные для обработки отверстий:						
сквозных	0⊕—5	10—20	45—60	10—30	0—10	0,1—0,6
глухих	0⊕—5	10—20	90—100	0—10	0—10	0,1—0,6
Резьбовые для метрической резьбы	0⊕—2	3—5	60	60	0	По резьбе

нами среза, когда максимальные напряжения в обрабатываемом материале смещаются от режущей кромки по направлению вдоль площадки контакта резец—деталь; при этом увеличивается упругое выпучивание металла, трение и температура на этой площадке. Увеличение заднего угла резца способствует уменьшению влияния этих явлений на износ инструмента.

При точении закаленных сталей резцами из композита рекомендуются отрицательные передние углы $\gamma = -10 \div -15°$, главные углы в плане $30° < \varphi \leqslant 60°$, угол наклона главной режущей кромки $\lambda = 0 \div 5°$, радиус при вершине резца $r = 0{,}1 \div 0{,}4$ мм.

В табл. 5.3 приведены геометрические параметры режущей части фрез, оснащенных кристаллами алмаза и поликристаллами из сверхтвердых материалов.

Конструкции лезвийного инструмента различаются методами закрепления режущих кристаллов в державке. Для алмазных резцов применяют следующие методы крепления кристалла в державке: а) прессование алмазов в металлокерамические вставки и крепление последних с помощью механических прижимов в державке; б) зачеканивание алмаза в закрытом пазу державки твердым припоем; в) пайка алмаза в открытом пазу державки твердым припоем.

Наибольшее применение для крепления кристалла в инструменте из эльбора-Р получили пайка и метод порошковой металлургии. При пайке заготовку из эльбора-Р крепят непосредственно в теле инструмента. Методом порошковой металлургии изготовляют вставки с режущим элементом из эльбора-Р, устанавливаемые в державку.

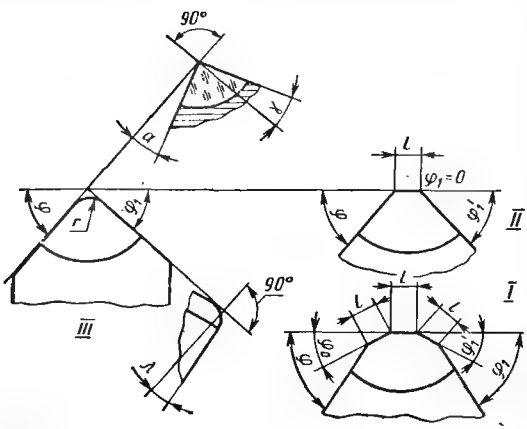


Рис. 5.1. Геометрия алмазного резца

Преимуществами пайки являются простота конструкции и небольшие габаритные размеры инструмента, высокая прочность и надежность крепления кристаллов, возможность использования кристаллов сравнительно небольшого размера (0,31—0,6 карата). Недостатками метода крепления пайкой являются нежелательный нагрев кристалла, необходимость в ряде случаев отпайки кристалла при переточке резца, необходимость подгонки поверхностей кристалла и дер-

Таблица 5.3

Геометрические параметры режущей части торцовых и дисковых фрез, оснащенных кристаллами алмаза и поликристаллами из сверхтвердых материалов

Материал обрабатываемой детали	Фрезы													
	Торцовые										Дисковые			
	А, АСБ, АСПК					ПКНБ					АСВ			
	γ	α	ψ	φ_1	λ	γ	α	φ	φ_1	λ	γ	α	φ	φ_1
Термопластичные и термореактивные пластмассы	10÷+15	12—15	45—60	10—15	10	—					0	12—15	5	10
Цветные металлы и алюминиевые сплавы	—					—10÷0	10—15	45—60	10—15	8—10	—			
Сталь $\sigma_B \leqslant 65$ кгс/мм							8—12							
Чугун $HB \leqslant 190$ кгс/мм²							10—12							
Бронза	0—5	12—15	45—60	10—15	10	—					0	10	2—3	8

Таблица 5.4

Цельные резцы с напаянными режущими элементами из сверхтвердых материалов (мм)

Тип резца	Эскиз	B	H	L	m	h
Прямой проходной		8	8	50	3	6
		10	10 16	60 100 125	4	8 14
		12	20	125 150	6	17
		16	16	125 150	7	14
			25	150 200	9	22
		20	20	125 150 200		17
Расточный для глухих отверстий		6	6	50	3	4
		8	8	50		6
		10	10	60		8
		10	10	100 125		14
		12	12	125 150	4	10
		16	16	150 200		13
		20	20	150 200 250		17

Таблица 5.5

Размеры цельных резцов, устанавливаемых в державки (мм)

D	H	l	h
6—20 6—12	4,5—18,5 5—11	10—100 10—60	— 3—6

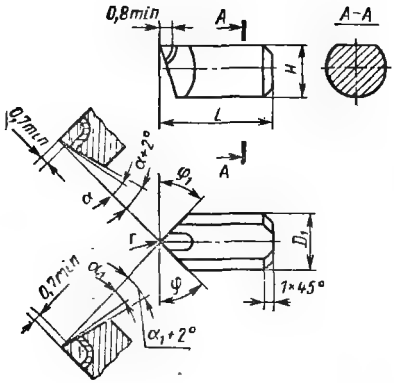


Рис. 5.2. Конструкция резца с напаянным режущим элементом

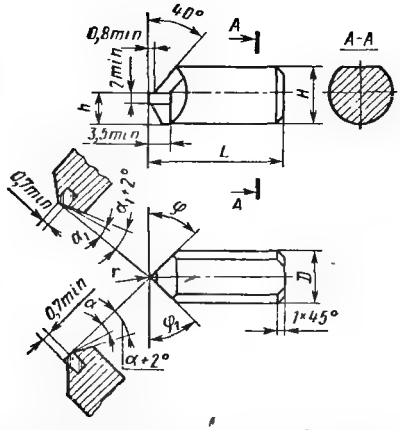


Рис. 5.3. Конструкция резца с запаянным или зачеканенным режущим элементом

жавки под пайку. Частично эти недостатки устраняют при предварительной металлизации кристаллов.

Важной положительной особенностью механического крепления кристаллов в державке является возможность использования одной державки для работы с различными кристаллами (меняется лишь вставка с алмазом или эльбором). Главными недостатками механического крепления являются сравнительно большие размеры державки, не позволяющие использовать алмазные и эльборовые резцы такого типа при обработке отверстий малого размера или при изготовлении малогабаритных деталей комплектом инструментов. Именно в связи с этим недостатком в инструментальной промышленности наряду с инструментами в которых вставки с кристаллами закрепляются механически, выпускают резцы и фрезы, в которых алмаз или эльбор закрепляют пайкой непосредственно в державке.

Всесоюзным научно-исследовательским инструментальным институтом (ВНИИинструмента) разработана весьма перспективная конструкция резцов с неперетачиваемыми многогранными пластинками из эльбора-Р, получаемыми шлифованием из цилиндрической заготовки [73].

В табл. 5.4 приведены типовые конструкции цельных резцов с напаянными режущими элементами из эльбора-Р.

На рис. 5.2 показана конструкция резцов с напаянными режущими элементами из сверхтвердых материалов, а в табл. 5.5 даны их размеры. На рис. 5.3 приведена конструкция резцов с зачеканенными или запаянными в закрытом пазу режущими элементами, а в табл. 5.5 даны размеры этих резцов. Резцы, показанные на рис. 5.2 и рис. 5.3, используют для установки в расточные державки или корпуса фрез [73].

На рис. 5.4 приведена конструкция и даны размеры металлокерамической вставки с режущим кристаллом. Вставки такого типа используют в резцах с механическим креплением (рис. 5.5 и 5.6). Габаритные размеры этих резцов $B = 12 \div 20$; $H = 16 \div 32$; $L = 100 \div 170$ мм.

При получистовом и черновом точении для снятия больших припусков можно применять многокромочные резцы конструкции Харьковского политехнического института (рис. 5.7). Резцы такого типа могут быть с двумя, тремя и четырьмя резцами-вставками. Каждый резец-вставка обеспечивает съем припуска в пределах 1—2 мм.

Фрезы, оснащенные кристаллами природных алмазов больших размеров, находят ограниченное применение на отдельных операциях в часовой и некото-

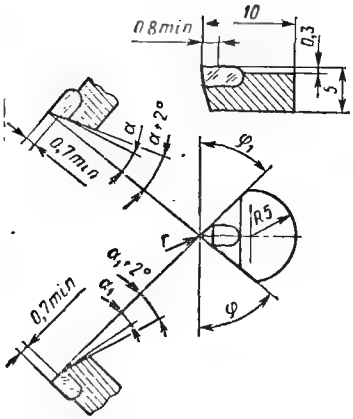
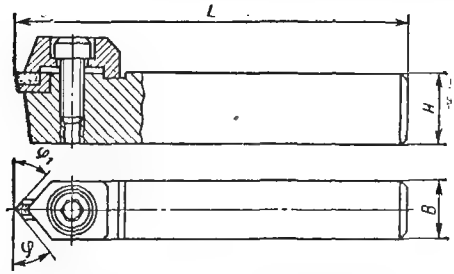


Рис. 5.4. Конструкция и размеры металлокерамической вставки с режущим элементом

Рис. 5.5. Резец сборный проходной с механическим креплением вставки с режущим элементом



рых других отраслях приборостроения. Дефицитность, большая стоимость и опасность случайных поломок таких кристаллов при работе в условиях резко изменяющихся силовых и термических нагрузок ведут к почти полной их замене фрезами, оснащенными поликристаллами больших размеров из синтетических алмазов типа баллас и карбонадо, эльбора-Р или и других синтетических сверхтвердых материалов.

На рис. 5.8. приведена конструкция фрезы, разработанная во ВНИИинструмента, для обработки поверхностей режущими элементами из эльбора-Р.

На рис. 5.9 и 5.10 показаны торцовые фрезы конструкции Харьковского политехнического института с плавным радиальным и осевым регулированием ножей, оснащенных поликристаллами из АСБ, а в табл. 5.6 приведены их размеры.

В основу конструкции фрезы с радиальным регулированием ножей положен принцип деформирования тонкой упругой стенки корпуса. Упругодеформируемая стенка надежно фиксирует требуемое положение ножа. Преимуществом этой фрезы является то, что в качестве ножей используют стандартные токарные резцы (ГОСТ 13292—67) со стандартными вставками (см. рис. 5.4). Наибольшее число зубьев, которые могут быть размещены на корпусах таких фрез, приведено в табл. 5.6.

Конструкция сборной торцовой фрезы с радиальным и осевым регулированием положения режущей части ножей показана на рис. 5.10. В корпусе фрезы сделаны прямоугольные пазы, соответствующие числу ножей. В каждом из пазов на оси-стяжке базируют и закрепляют, как и у описанной выше фрезы, цангову призматическую кассету. Кассета может качаться на оси стяжки при регулировании положения режущих кромок в радиальном направлении. Осевое регулирование осуществляют перемещением цилиндрического ножа (рис. 5.11) вдоль его оси с последующим закреплением цангового зажима кассеты.

Таблица 5.6

Наибольшее число зубьев у сборных торцовых фрез в зависимости от диаметра корпуса

Конструкция	Число зубьев z у фрезы диаметром D, мм				
	80	100	120	150	200
См. рис. 5.9	4	6	8	12	16
См. рис. 5.10	—	—	6	8	12

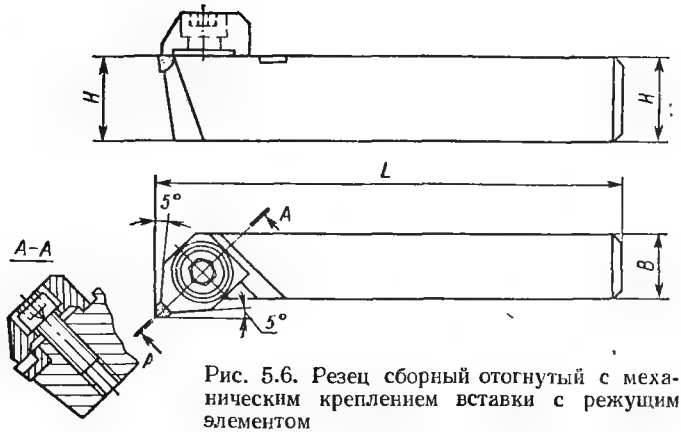


Рис. 5.6. Резец сборный отогнутый с механическим креплением вставки с режущим элементом

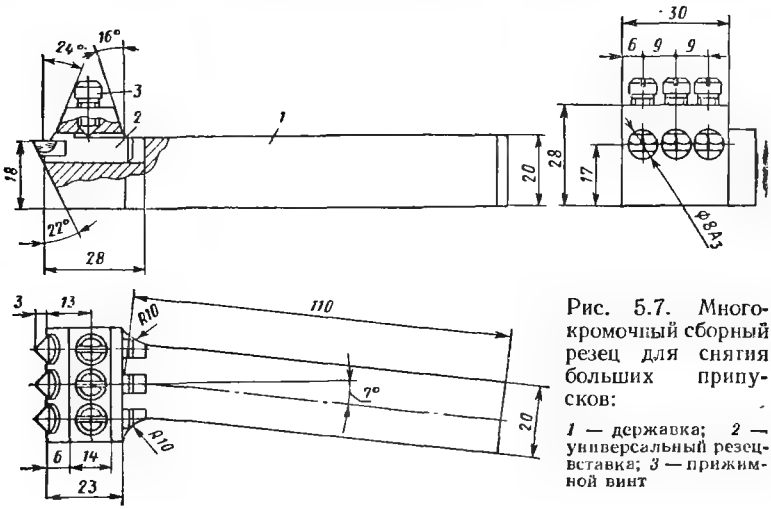


Рис. 5.7. Многокромочный сборный резец для снятия больших припусков:

1 — державка; *2* — универсальный резец-вставка; *3* — прижимной винт

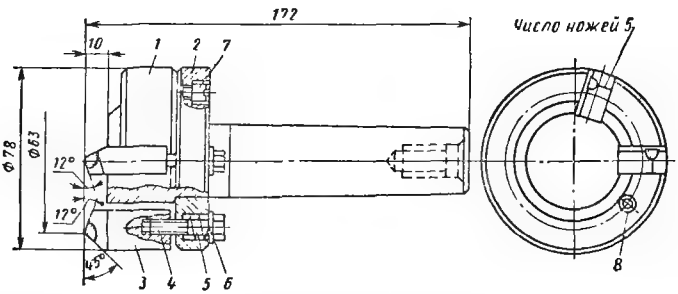


Рис. 5.8. Фреза торцовая с режущими элементами из эльбора-Р:

1 — корпус; *2* — кольцо; *3* — вставка с эльбором-Р; *4* — болт; *5* — пружина; *6* — шайба; *7* — винт; *8* — штифт

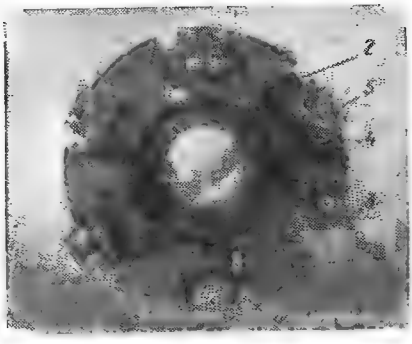


Рис. 5.9. Сборная торцовая фреза с плавно регулируемыми в радиальном и осевом направлениях стандартными резцами:

1 — корпус; *2* — гайка; *3* — упругодеформируемая стенка; *4* — нож; *5* — стандартная вставка из АСБ

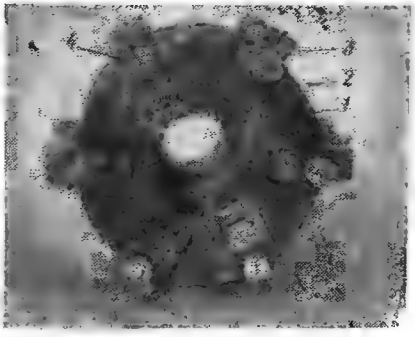


Рис. 5.10. Сборная торцовая фреза с плавно регулируемыми в радиальном и осевом направлениях ножами из АСБ:

1 — корпус; *2* — упругодеформируемая стенка; *3* — кассета; *4* — нож с припаянной пластинкой

Заточку и доводку лезвийного инструмента из алмазов и других синтетических сверхтвердых материалов производят на предприятиях, изготовляющих эти инструменты. В случае, если заточку (шлифование) производят непосредственно на предприятии-потребителе, необходимо соблюдать некоторые основные правила.

Алмаз шлифуют алмазными кругами на металлической связке или чугунными дисками, шаржированными алмазными порошками. Алмазные круги зернистостью 28/20 или 40/28 стопроцентной концентрации применяют в том случае, когда с кристалла необходимо удалить сравнительно большой слой, и при шлифовании радиуса закругления между кромками резца в плане. Окончательное шлифование и доводку алмазных резцов производят дисками из чугуна СЧ 12-8 или СЧ 15-32. Для доводки диски шаржируют алмазными порошками малых номеров зернистости и микропорошками. Скорость шлифования (окружная скорость диска) должна быть в пределах 25—40 м/с. Диск должен быть хорошо обработан и точно установлен на шпинделе станка, с тем чтобы торцовое биение на периферии не превышало 3—5 мкм.

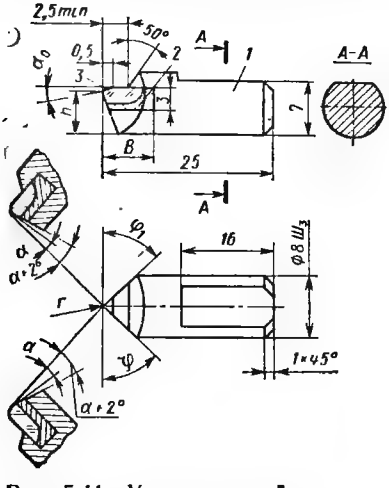


Рис. 5.11. Универсальный резец с запянной металлокерамической вставкой:

1 — державка; *2* — металлокерамическая вставка; *3* — синтетический поликристаллический алмаз

Шлифование или переточку алмазного резца начинают с передней поверхности. Затем обрабатывают задние поверхности и криволинейный участок между кромками в плане. Последней операцией является доводка передней поверхности, при которой снимают все сколы, выкрашивания и другие дефекты. При шлифовании и доводке передней поверхности резца направление вращения шлифовального круга или диска должно быть на

Таблица 5.7

Рекомендации по заточке и доводке резцов из эльбора-Р

Операция	Характеристика круга (пасты)	Станок	Режим обработки		
			Скорость круга м/с	Продольная подача, м/мин	Глубина резания, мм/дв. ход
Предварительная обработка корпуса (державки)	24А25СМ2К	Заточной	25	3	0,04
Заточка:					
режущей кромки по главной и вспомогательной задней поверхностям	АСО80/63—125/100 Б1 100%	»	25	1	0,01—0,02
передней поверхности	АСО80/63—125/100Б1 100%	»	25	1	0,01—0,02
Доводка передней поверхности	АСМ 28/20—14/10Б1 100%	»	15	0,5	0,005
	Паста АМ, АСМ, 28/20—20/14	Притирочный	—	—	—
Доводка задних поверхностей и радиуса при вершине	АСМ3/2Б1 100%	3А64М	25	0,5	0,05
	Паста АМ, АСМ, 28/20—20/14	Притирочный	—	—	—

режущую кромку, а направление подачи навстречу кромке (наибольшее отклонение до 45°). Это необходимо воизбежание сколов алмаза. После окончательного шлифования и доводки шероховатость режущих поверхностей алмаза должна находиться в пределах $Ra = 0{,}01 \div 0{,}04$ мкм.

Рекомендации по заточке и доводке резцов из эльбора приведены в табл. 5.7 [73]. Обработку режущих элементов из эльбора следует проводить с применением СОЖ.

После заточки и доводки режущие поверхности инструмента из эльбора-Р должны иметь шероховатость $Ra = 0{,}16 \div 0{,}08$ мкм.

§ 5.2. Процесс резания при точении и фрезеровании алмазами и другими синтетическими сверхтвердыми материалами

Особенности процесса резания алмазными резцами предопределяются физико-химическими свойствами алмаза: низким коэффициентом трения алмаза; высокими коэффициентами тепло- и температуропроводности, что обеспечивает сравнительно низкие температуры в зоне резания и позволяет производить обработку на высоких скоростях резания, достигающих 1000 м/мин; высокой режущей способностью кромок резца [малые значения радиуса скругления ($\rho = 0{,}1 \div 1$ мкм)]; малыми силами резания по сравнению с тонким точением резцами из других инструментальных материалов (P_z меньше в 1,5—3 раза, P_y в 3—12 раз); высокой износостойкостью, что обеспечивает высокую размерную стойкость инструмента; наличием нароста на резце в широком диапазоне скоростей резания при точении наростообразующих материалов, что связано с высокой теплопроводностью алмаза и малыми температурами на рабочих поверхностях инструмента, недостаточными для вырождения нароста.

Смазочно-охлаждающие жидкости не оказывают существенного влияния на процесс алмазного точения. Однако применение СОЖ предохраняет чистые ювенильные поверхности от приваривания к ним мелких частиц стружки, сни-

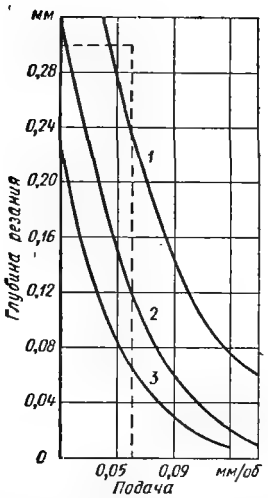


Рис. 5.12. Зависимость параметров среза (l_0, v) от длины вылета алмаза в державке резца при продольном точении меди М1. Слева от кривых находятся области параметров среза, при которых процесс резания протекает нормально, справа от кривых — области параметров среза, при которых процесс резания практически невозможен из-за интенсивного торможения и заклинивания стружки:

1) $l_0 = 1{,}2$ мм; $v = 350$ м/мин;
2) $l_0 = 0{,}8$ мм; $v = 100$ м/мин;
3) $l_0 = 0{,}8$ мм; $v = 350$ м/мин

жающих качество обработки. Благодаря малым значениям коэффициента трения, радиуса скругления режущей кромки, температуры и сил резания при алмазном точении обеспечивается высокое качество обработанной поверхности. Алмазное точение имеет высокую экономическую эффективность, достигающую 50—100 р. при внедрении одного карата алмаза.

Стружкообразование при алмазном точении отличается от стружкообразования при тонком точении резцами из других инструментальных материалов. Вследствие низкого коэффициента трения при алмазном точении в контакте стружки с резцом превалирует внешнее трение, а при тонком точении внутреннее трение. Процесс алмазного точения характеризуется большими углами сдвига и малыми деформациями стружки. Усадка стружки при алмазном точении намного меньше, чем при тонком точении. Так как коэффициент трения практически не зависит от скорости скольжения в большом интервале скоростей, то и усадка стружки с изменением скорости резания изменяется весьма мало. Значительное увеличение толщины среза мало влияет на усадку стружки, так как процесс резания определяется внешним трением.

Большое влияние на процесс резания оказывает длина вылета алмаза в державке резца. У резцов из природных алмазов эта величина невелика (0,8—1,2 мм). Малый вылет алмаза l_0 сильно ограничивает сечения среза при алмазном точении. Большие размеры поликристаллов синтетических алмазов позволяют значительно увеличить длину вылета l_0. Увеличение длины вылета и применение резцов с открытой передней поверхностью допускает резкое увеличение допустимых сечений среза, что обеспечивает не только чистовое, но и черновое алмазное точение (рис. 5.12).

Особенностью алмазного точения труднообрабатываемых высокоабразивных материалов является то, что силы резания с увеличением износа резца возрастают незначительно, так как по мере износа алмазного резца его режущая способность непрерывно восстанавливается. Весьма малое изменение сил резания с износом инструмента (особенно P_y) обеспечивает малое изменение теплонапряженности процесса резания даже при больших значениях износа алмазного резца.

Скорость резания в широком диапазоне ($v = 50 \div 1000$ м/мин) оказывает незначительное влияние на силы резания. Для расчета составляющих сил резания могут быть использованы зависимости

$$P_z = C_{Pz} ts + K_z l_к; \quad (5.1)$$

$$P_y = C_{Py} ts + K_y l_к, \quad (5.2)$$

Таблица 5.8

Значения коэффициентов к формулам (5.1) и (5.2)

Материал обрабатываемой детали	C_{Pz}	C_{Py}	K_z	K_y
Медь М1	105	20	1,1	0,56
Латунь Л62	97,5	13,3	0,55	0,37
Дюралюминий Д16Т	74,2	8	0,37	0,18
Гетинакс	46	7	0,37	1,05
Стеклопластик СВАМ	31	2,5	0,37	1,1
Титановый сплав	150	138	4,62	5,9

где C_{Pz} и C_{Py} — постоянные коэффициенты, зависящие от обрабатываемого материала и условий обработки; t — глубина резания, мм; s — подача, мм/об; K_z и K_y — коэффициенты, связанные с удельными давлениями на задней поверхности резца; $l_к$ — длина контакта режущих кромок резца с деталью.

Длину контакта для фасеточного резца рассчитывают по формуле

$$l_к = l + \frac{t}{\sin \varphi},$$

где l — длина фасетки (зачистной режущей кромки), параллельной направлению подачи (см. рис. 5.1).

В табл. 5.8 приведены значения коэффициентов для расчета составляющих сил резания при продольном точении резцами из природных алмазов при следующих геометрических параметрах режущей части инструмента: $\gamma = 0°$; $\alpha = 10°$; $\lambda = 0°$. Приведенные зависимости могут быть использованы при $v = 50 \div 800$ м/мин; $s = 0{,}01 \div 0{,}15$ мм/об, $t = 0{,}01 \div 0{,}5$ мм, а для титановых сплавов при $v = 150 \div 250$ м/мин; $s = 0{,}01 \div 0{,}1$ мм/об; $t = 0{,}01 \div 0{,}3$ мм.

При точении деталей из указанных материалов резцами из синтетических поликристаллических алмазов силы резания больше в 1,5—2 раза.

В табл. 5.9 приведены коэффициенты и показатели степеней в формулах для расчета сил P_z, P_y и P_x, возникающих при точении деталей из некоторых материалов резцами из альбора-Р. Общий вид формул:

$$\left.\begin{aligned} P_z &= C_{Pz} t^{x_{Pz}} s^{y_{Pz}} v^{z_{Pz}}; \\ P_y &= C_{Py} t^{x_{Py}} s^{y_{Py}} v^{z_{Py}}; \\ P_x &= C_{Px} t^{x_{Px}} s^{y_{Px}} v^{z_{Px}}. \end{aligned}\right\} \qquad (5.3)$$

Таблица 5.9

Коэффициенты и показатели степеней в формулах (5.3)

Материал обрабатываемой детали	C_{Pz}	x_{Pz}	y_{Pz}	z_{Pz}	C_{Py}	x_{Py}
Стали:						
Р18, Р6М5, ХВГ, ШХ15 (*HRC* 62—64)	405	1,0	0,65	—0,15	325	0,88
30ХГСНА (*HRC* 44—50)	960	0,9	0,75	—0,30	466	0,95
40ХН2СМА (*HRC* 44—50)	416	0,86	9,58	—0,20	301	0,70

Материал обрабатываемой детали	y_{Py}	z_{Py}	C_{Px}	x_{Px}	y_{Px}	z_{Px}
Стали						
Р18, Р6М5, ХВГ, ШХ15 (*HRC* 62—64)	0,56	—0,15	159	1,1	0,48	—0,15
30ХГСНА (*HRC* 44—50)	0,75	—0,05	616	1,2	0,55	—0,40
40ХН2СМА (*HRC* 44—50)	0,56	—0,12	143	1,0	0,40	—0,15

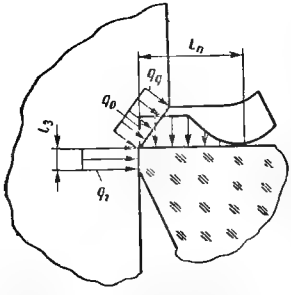


Рис. 5.13. Источники теплообразования при точении алмазами и другими синтетическими материалами

Температура при алмазном точении играет существенную роль, поскольку за известным пределом температур алмаз теряет режущие свойства. При точении сверхтвердых закаленных сталей резцами из эльбора-Р удельные силы резания достаточно велики, поэтому в зоне контакта инструмента с обрабатываемым материалом могут возникнуть высокие температуры. Они оказывают влияние не только на стойкость инструмента, но и на точность и качество поверхностного слоя деталей через термические деформации.

В связи с высокой твердостью и неэлектропроводностью кристалла, а также малыми сечениями среза при алмазном точении измерение температур естественной термопарой или термопарами, заложенными в инструменте, практически невозможно. В практике нашли применение прижимные термопары или полуискусственные термопары, закладываемые в деталь; они позволяют ориентировочно оценивать температуру резания. Экспериментальные исследования при точении закаленных сталей приводят к зависимостям:

для стали ХВГ, *HRC* 60—62

$$\theta = 490 t^{0,09} s^{0,12} v^{0,2};$$

для стали Р18, *HRC* 62—64

$$\theta = 278 t^{0,08} s^{0,23} v^{0,42}.$$

В связи с трудностями экспериментального определения температуры при точении алмазами и другими синтетическими сверхтвердыми материалами целесообразно использовать расчетные или расчетно-экспериментальные методы. Ниже изложен порядок расчета температур при точении, основанный на теплофизическом анализе процесса.

Вначале определяют интенсивность источников теплообразования: теплоту деформации в виде источника интенсивностью $q_д$ на поверхности сдвига (рис. 5.13), теплоту трения на задней поверхности резца в виде источника интенсивностью q_1 и теплоту трения на передней поверхности, распределенную неравномерно при наибольшей интенсивности q_0. Интенсивность источников рассчитывают по формулам

$$q_д \approx \frac{3,9v}{tsk\sqrt{k^2+1}} [(P_z - F_{т.з}) k - (P_N - N_з)]; \quad (5.4)$$

$$q_0 \approx 8,3 \frac{v}{k} \frac{P_N - N_з}{B l_п}; \quad (5.5)$$

$$q_1 \approx 3,9 \frac{F_{т.з} v}{B l_з}, \quad (5.6)$$

где v — скорость резания, м/мин; t — глубина резания, мм; s — подача, мм/об; k — коэффициент усадки стружки; P_z — тангенциальная составляющая силы резания, кгс; $P_N = \sqrt{P_y^2 + P_x^2}$ — нормальная составляющая силы резания, кгс; $F_{т.з} \approx N_з \approx 0,25\sigma_в B l_з$ — сила трения и нормальная сила, действующие на задней поверхности инструмента, кгс; $\sigma_в$ — временное сопротивление разрыву обрабатываемого материала, кгс/мм²; $B \approx \sqrt{2rt}$ — длина активной части режущей кромки резца, имеющей радиус закругления r; $l_п$ и $l_з$ — соответственно длины контактных площадок на передней и задней поверхностях кристалла, мм.

Средняя температура на площадке контакта кристалла со стружкой

$$\theta_{c_{ср}} = 1{,}05\theta_д + \theta_{т.\,п} - \theta_{p_{ср}} = 1{,}05\theta_д + 0{,}36\,\frac{l_п \nu_1}{\lambda}\,(q_0 - 2{,}16 q_п), \qquad (5.7)$$

где

$$\theta_д \approx 0{,}6\,\frac{\omega}{\lambda}\,b^* q_0\,\frac{k}{v}; \qquad (5.8)$$

$\theta_{т.\,п}$ — среднее по площадке контакта повышение температуры, вызванное трением стружки о резец; $\theta_{p_{ср}}$ — среднее по площадке контакта снижение температуры, вызванное оттоком тепла в резец; ν_1 — функция, учитывающая влияние конфигурации площадки и режима трения; ω и λ — соответственно коэффициенты температуро- и теплопроводности обрабатываемого материала, см²/с и кал/с·град; $q_п$ — средняя интенсивность потока, образующегося как результат теплообмена между стружкой и резцом, кал/см² с; b^* — коэффициент, определяющий, какая часть теплоты деформации уносится со стружкой.

$$\nu_1 = 1{,}95\left(\frac{k\omega}{vB}\right)^{0{,}67}; \qquad (5.9)$$

$$b^* = \frac{1}{1 + 3{,}25k\sqrt{\dfrac{B\omega}{vts\sqrt{k^2+1}}}}. \qquad (5.10)$$

Среднюю температуру на площадке контакта детали с резцом рассчитывают по формуле

$$\theta_{п_{ср}} = 0{,}95\theta_д + 0{,}1\,\frac{\sqrt{\omega}}{\lambda}\sqrt{\frac{l_з}{v}}\,(q_1 - 1{,}82 q_з), \qquad (5.11)$$

где $q_з$ — средняя интенсивность потока, образующегося как результат теплообмена между деталью и резцом.

Интенсивность $q_з$, так же как и $q_п$, не может быть установлена экспериментальным путем. Для определения $q_з$ и $q_п$ сравнивают средние температуры, рассчитанные со стороны стружки и детали [формулы (5.7) и (5.11)], со средними температурами соответствующих площадок контакта на передней ($\theta_{п_{ср}}$) и задней ($\theta_{з_{ср}}$) поверхностях резца, рассчитанными со стороны инструмента. Применительно к алмазному точению для расчета температур со стороны резца можно использовать формулы

$$\theta_{п_{ср}} \approx 2{,}6 q_п l_п T_1 + 2{,}86 q_з l_з n_2 T_2, \qquad (5.12)$$

$$\theta_{з_{ср}} \approx 2{,}86 q_п l_з n_1 T_1 + 2{,}74 q_з l_з T_2. \qquad (5.13)$$

При точении другими инструментальными материалами выражения (5.12) и (5.13) принимают вид

$$\theta_{п_{ср}} \approx \frac{0{,}91}{\lambda_р}\,q_п l_п T_1 + \frac{1}{\lambda_р}\,q_з l_з n_2 T_2$$

и

$$\theta_{з_{ср}} \approx \frac{1}{\lambda_р}\,q_п l_п n_1 T_1 + \frac{0{,}96}{\lambda_р}\,q_з l_з T_2,$$

где $\lambda_р$ — коэффициент теплопроводности режущего материала.

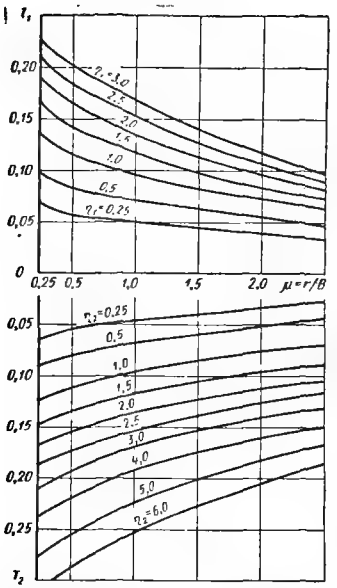


Рис. 5.14. Графики функций T_1 и T_2

Значения функций T_1, T_2, входящих в последние формулы, приведены на рис. 5.14, а значения n_1 и n_2 в табл. 5.10.

Значения функций n_1, n_2 зависят от соотношения между длиной контактных площадок на передней $l_п$ и задней $l_з$ поверхностях резца (рис. 5.13). Значения функций T_1 и T_2 зависят от безразмерных величин

$$\mu = \frac{r}{B}; \quad \eta_1 = \frac{B}{l_п}; \quad \eta_2 = \frac{B}{l_з}.$$

Приравнивая формулу (5.7) к формуле (5.12), а (5.8) к (5.13), получают два уравнения с двумя неизвестными, решая которые, определяют величины $q_п$ и $q_з$ и температуры контактных поверхностей инструмента.

Пример. Рассчитать температуры на контактных поверхностях алмазного резца при точении титанового сплава ($\sigma_в = 77$ кгс/см²; $\lambda = 0{,}031$ кал/см·с·град; $\omega = 0{,}043$ см²/с).

Режим резания: $v = 200$ м/мин; $t = 0{,}04$ мм; $s = 0{,}03$ мм/об; силы резания $P_z = 0{,}78$ кгс; $P_y = 0{,}18$ кгс; $P_x = 0{,}64$ кгс; $F_{т.з} \approx N_з \approx 0{,}2$ кгс; усадка стружки $k = 1{,}5$; $l_п = 0{,}5$ мм; $l_з = 0{,}05$ мм; $r = 0{,}5$ мм; $F = \sqrt{2rt} = 0{,}2$мм.

Интенсивность тепловых потоков, рассчитываемая по формулам (5.4)—(5.6): $q_д = 100\,000$ кал/см²·с; $q_0 = 5090$ кал/см²·с; $q_1 = 15\,600$ кал/см²·с. Относительное количество теплоты деформации, уходящее со стружкой [формула (5.10)],

$$b^* = \frac{1}{1 + 3{,}25 \cdot 1{,}5 \sqrt{\dfrac{0{,}2 \cdot 0{,}013}{200 \cdot 0{,}04 \cdot 0{,}03 \sqrt{1{,}5^2 + 1}}}} = 0{,}6.$$

Температура деформации $\theta_д \approx 374°$ С [формула (5.8)], средняя температура контакта, рассчитанная со стороны стружки, $\theta_{сср} = 1165 - 0{,}328 q_п$ [формула (5.7)]. Средняя температура на площадке контакта, рассчитанная со стороны детали, $\theta_{дср} = 520 - 0{,}019 q_з$ [формула (5.11)].

Безразмерные величины $\eta_1 = \dfrac{0{,}2}{0{,}5} = 0{,}4$; $\eta_2 = 4$; $\mu = 2{,}5$. Значения функций (см. рис. 5.13 и табл. 5.10): $n_1 = 0{,}97$; $n_2 = 0{,}36$; $T_1 = 0{,}045$; $T_2 = 0{,}155$. Температуры, рассчитанные со стороны резца:

$$\theta_{пср} = 0{,}0585 q_п + 0{,}008 q_з \text{ и } \theta_{зср} = 0{,}0617 q_п + 0{,}0212 q_з.$$

Таблица 5.10

Значение функций n_1 и n_2 в формулах (5.12) и (5.13)

$l_п/l_з$	n_1	n_2	$l_п/l_з$	n_1	n_2	$l_п/l_з$	n_1	n_2
0,5	0,63	0,85	4,0	0,89	0,54	8,0	0,95	0,41
1,0	0,72	0,77	5,0	0,92	0,50	9,0	0,96	0,39
2,0	0,83	0,67	6,0	0,93	0,46	10,0	0,97	0,36
3,0	0,86	0,60	7,0	0,94	0,43			

Исходные уравнения для определения $q_п$ и $q_з$:

$$1165 - 0{,}328q_п = 0{,}0585q_п + 0{,}008q_з;$$

$$520 - 0{,}019q_з = 0{,}0617q_п + 0{,}0212q_з;$$

$$q_п = 2840 \text{ кал/см}^2\cdot\text{с}; \quad q_з = 8550 \text{ кал/см}^2\cdot\text{с}.$$

Средняя температура на площадке контакта передней поверхности резца со стружкой $\theta_п = \theta_{c_{ср}} = 1165 - 0{,}328\cdot 2840 = 235°$ С, а задней поверхности с деталью $\theta_з = \theta_{п_{ср}} = 520 - 0{,}019\cdot 8550 = 360°$ С.

При точении эльбором-Р, сохраняя данные условия, получаем $\theta_п \approx 460°$ С и $\theta_з \approx 500°$ С только за счет снижения теплопроводности режущего материала ($\lambda_р = 0{,}1$ кал/см·с·°С).

Температуры, возникающие при точении алмазами, ниже температур при точении резцами из эльбора или твердых сплавов при одних и тех же условиях. Это различие в температурах резко возрастает с увеличением скорости резания и является результатом влияния двух факторов: изменения интенсивности теплообразующих источников и разницы в теплопроводности режущих материалов.

При алмазном точении имеет место иное соотношение между $\theta_п$ и $\theta_з$, чем при работе твердосплавными резцами. При работе незатупившимися алмазными инструментами, как правило, наиболее нагретой оказывается задняя поверхность ($\theta_з > \theta_п$), а твердосплавными — передняя ($\theta_п > \theta_з$).

Износ и стойкость алмазных резцов и резцов из других инструментальных материалов различаются и качественно и количественно. При алмазном точении цветных металлов и пластмасс стойкость резцов высокая и составляет 300 ч и более. Алмазные резцы выходят из строя часто из-за выкрашивания режущих кромок, которое носит случайный характер.

При точении материалов, обладающих абразивными свойствами, таких как высококремнистые алюминиевые и медные сплавы, стеклопластики, пластическая керамика и другие, износ алмазных резцов — механический, в виде микросколов и микровыкрашиваний по задним поверхностям.

При точении титановых сплавов износ алмазных резцов происходит преимущественно по задним поверхностям. Однако, кроме механического, имеет место и адгезионный износ. Сущность износа резцов из природных и синтетических поликристаллических алмазов существенно различается. Резцы из природных алмазов изнашиваются вследствие образования микросколов, причем микротрещины могут проникать на значительную глубину монокристалла. У резцов из поликристаллов алмаза микротрещины, как правило, глубоко не проникают, так как их локализуют границы отдельных кристаллов и металлические включения поликристаллов. Вследствие указанного различия в характере износа стойкость резцов из поликристаллов выше, чем резцов из природных монокристаллов алмаза. При точении материалов, обладающих абразивными свойствами, с повышением скорости резания износ алмазных резцов увеличивается, однако длина пути резания до одинаковой величины износа при этом не зависит от скорости резания в широком диапазоне ($v = 50 \div 750$ м/мин).

Это позволяет вести обработку абразивных материалов на высоких скоростях резания и тем самым значительно повышать производительность алмазного точения.

В качестве критерия затупления резцов из природных и синтетических алмазов *при точении малоабразивных цветных металлов и пластмасс на финишных* операциях следует принимать увеличение Ra вдвое, что соответствует износу резца по задней поверхности $h_з = 0{,}01 \div 0{,}1$ мм. При обработке материалов, обладающих абразивными свойствами, допустимая величина износа алмазных резцов может быть увеличена до $h_з = 0{,}2 \div 0{,}25$ мм в зависимости от требований к шероховатости обработанной поверхности.

Процесс точения сталей алмазными резцами на малых скоростях резания (до 20 м/мин) характеризуется действием высоких удельных давлений на заднюю поверхность резца (более 200 кгс/мм²), что приводит к интенсивному механическому износу режущих кромок. При высоких скоростях резания, когда на резце образуется нарост, повышенный износ происходит в результате срывов нароста и динамической неустойчивости процесса резания.

При продольном точении материалов, обладающих абразивными свойствами, стойкость резцов из природных и синтетических (АСП) алмазов можно рассчитывать по формуле

$$T = \frac{C_v}{v},$$

где v — скорость резания, м/мин; C_v — постоянный коэффициент, зависящий от свойств обрабатываемого материала и условий обработки (табл. 5.11).

Исследование процесса обработки закаленных сталей (45, Х12М, У10, Р6М5 и др.), а также высокопрочных и легированных чугунов резцами из эльбора-Р позволило установить, что в процессе резания эльборовыми резцами стружкообразование, силы резания и тепловые явления имеют специфические особенности. На усадку стружки, кроме скорости резания, подачи и твердости обрабатываемого материала, большое влияние оказывает и износ резца. При обработке эльборовыми резцами закаленных сталей возникают высокие температуры, при которых резец достигает в некоторых случаях красностойкости. Расчеты температуры резания, выполненные по изложенной выше методике показали, что температуры при обработке закаленной стали У10 ($v = 75$ м/мин; $s = 0{,}04$ м/мин; $t = 0{,}2$ мм и $h_з = 0{,}3$ мм) близки к температуре плавления обрабатываемого материала и равны 1100° С.

Износ резцов из эльбора-Р при обработке закаленных сталей происходит в начальный период работы по главной режущей кромке и по главной задней поверхности, а затем захватывает часть вспомогательной задней поверхности. В качестве критерия затупления для резцов из эльбора-Р принимают ширину контактной площадки износа $h_з = 0{,}4$ мм по данным поверхностям. При $h_з \leqslant 0{,}4$ резцы из эльбора-Р сохраняют высокие режущие свойства, сила резания возрастает незначительно, шероховатость обработанной поверхности не выходит за пределы $Ra = 0{,}32 \div 1{,}25$ мкм. Для сталей твердостью HRC 60—65 стойкость инструмента из эльбора ($\varphi = 35°$; $\varphi_1 = 15°$; $\gamma = -10°$; $\alpha = 12 \div 15°$; $r = 0{,}3 \div 0{,}6$) описывается зависимостью

$$T = \frac{52{,}6 \cdot 10^4}{v^{1{,}65} t^{0{,}3} s^{0{,}5}} K_м.$$

Коэффициент $K_м$, учитывающий марку обрабатываемого материала для сталей Р6М5 и Р6М3, равен единице, а для сталей Р18, ХВГ и ШХ15 соответственно 1,1; 1,2; 0,9. Формула, приведенная выше, справедлива при $v = 50 \div 180$ м/мин; $s = 0{,}02 \div 0{,}16$ мм/об; $t = 0{,}1 \div 1{,}5$ мм.

Качество поверхности при алмазном точении выше, чем при тонком точении резцами из других инструментальных материалов. Характерной особенностью алмазного точения является то, что при обработке материалов, обладающих абразивными свойствами, с ростом износа резца до $h_з = 0{,}1$ мм высота микронеровностей обработанной поверхности не только не увеличивается, а даже

Таблица 5.11

Значения коэффициента C_v

Материал обрабатываемой детали	C_v для алмаза		Материал обрабатываемой детали	C_v для алмаза	
	природного	синтетического, поликристаллического		природного	синтетического, поликристаллического
Стеклопластик СВАМ	100 000	200 000	Пластическая керамика	90 000	150 000
Стеклотекстолит СТ	110 000	180 000	Алюминиевый сплав АЛ-25	260 000	525 000

уменьшается. Это достигается благодаря тому, что площадка износа алмазного резца представляет собой развитую поверхность излома с множеством острых микрокромок, которые в процессе резания подшлифовывают обработанную поверхность.

Существенное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает правильная установка фасеточных резцов в плане. Непараллельность установки одной из фасеток относительно направления подачи может значительно увеличить шероховатость.

При точении таких материалов, как стеклопластик, керамика и другие не требуется точной установки инструмента в плане, так как фасетки резца быстро прирабатываются. Для точной установки фасеточных резцов в плане применяют специальные установочные шаблоны или микроскопы.

На шероховатость обработанной поверхности оказывает влияние также точность установки резца по высоте. Для получения наименьшей шероховатости поверхности следует резец устанавливать точно по центру, либо выше центра, но так, чтобы отношение высоты смещения к диаметру детали не превышало 0,02.

Наибольшее влияние из элементов режима резания на шероховатость обработанной поверхности при продольном точении оказывает подача. Скорость и глубина резания при алмазном точении оказывают весьма малое влияние на шероховатость. При точении цветных металлов и сплавов резцами из синтетических поликристаллических алмазов шероховатость обработанной поверхности значительно выше вследствие большей шероховатости режущих кромок резцов из поликристаллов по сравнению с резцами из природных алмазов.

При точении эльбором-Р главное влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает подача. Существенную роль играет также радиус закругления r между кромками в плане. При подачах $s = 0{,}01 \div 0{,}03$ мм/об в случае обработки эльбором закаленных сталей шероховатость поверхности возрастает незначительно и соответствует $Ra = 0{,}08 \div 0{,}32$ мкм независимо от r. В дальнейшем, при увеличении подачи и уменьшении r шероховатость поверхности возрастает более интенсивно. Для получения шероховатости поверхности в пределах $Ra = 0{,}32 \div 1{,}25$ мкм при $s \leqslant 0{,}08$ мм/об необходимо применять резцы с $r \geqslant 0{,}6$ мм, а при $0{,}08 < s \leqslant 0{,}16$ мм/об $r \geqslant 1{,}2$ мм [73].

Стружкообразование при фрезеровании материалов поликристаллами протекает с меньшей деформацией срезаемого слоя и более низкой температурой резания, чем при резании другими инструментами.

Температуру резания при фрезеровании неметаллических материалов можно измерять способом двух встроенных электродов. По результатам измерений получена формула $\theta = 36{,}2v^{0,32}$ при обработке гетинакса фрезой с режущими элементами из АСБ ($t = 2$ мм; $s_z = 0{,}32$ мм/зуб).

Силы резания при обработке материалов фрезами, оснащенными поликристаллами, на 8—20% меньше сил, возникающих при аналогичных условиях резания фрезами из твердых сплавов.

Тангенциальная составляющая P_z силы резания при симметричном фрезеровании стеклотекстолита и асбестоцемента может быть подсчитана по формуле

$$P_z \approx C_{P_z} s^{0,45} t^{0,8} K_м K_\gamma K_и. \qquad (5.14)$$

Формула (5.14) верна для $v = 150 \div 670$ м/мин; $s_z = 0{,}05 \div 0{,}5$ мм/зуб; $t = 0{,}25 \div 2$ мм; диаметра фрезы $D = 100$ мм; $\gamma = 5°$; $r = 0{,}5$ мм, при этом $C_{P_z} = 10 \div 7{,}6$. В табл. 5.12 и ниже приведены поправочные коэффициенты на измененные условия работы.

Износ режущей части фрезы заметно влияет на силу резания, что объясняется значительным изменением формы режущего клина, главным образом увеличением радиуса скругления режущей кромки. Так, при фрезеровании асбестоцемента 400 фрезой из АСБ изменение главной составляющей силы резания с учетом износа инструмента составляет

$$P_z = Ch_з^{0,22},$$

где $h_з = 0{,}002 \div 0{,}8$ — износ по задней поверхности зуба, мм. При фрезеровании

Таблица 5.12

Поправочные коэффициенты к формуле (5.14) при фрезеровании пластмасс

Обрабатываемый материал	$K_м$	Обрабатываемый материал	$K_м$
Стеклотекстолит СТ	1,00	Фенопласт К21-2	0,88
Стеклотекстолит СТЭФ	1,17	Винипласт	0,80
Гетинакс Ш	0,94	Эбонит А	0,66
Текстолит ПТ	0,86	Органическое стекло	0,72
Фторопласт	0,92	Капрон	0,70

Передний угол γ, град	$-10 \div 0$	$0 \div 8$	8—15
K_γ	1,2	1,0	0,95
Износ фрезы, мм	0—0,05	0,05—0,10	0,10—0,15
$K_и$	1,00	1,12	1,20

пластмасс, цветных и легких сплавов показатель степени при износе почти в 2 раза больше, чем при обработке асбестоцемента.

Значение других составляющих силы резания при фрезеровании пластмасс и асбестоцемента можно определить, имея в виду, что горизонтальная составляющая в направлении подачи детали $P_п \approx (0,5 \div 0,7)\ P_z$, а осевая составляющая $P_0 \approx (0,6 \div 0,7)\ P_z$.

Сравнительно большой радиус скругления режущей кромки у инструментов из АСБ, получающийся после обычной алмазной заточки, и интенсивное увеличение скругления кромки с ростом износа при фрезеровании заметно влияют на температуры, силы резания и качество обработки. Это обстоятельство следует учитывать при выборе критерия затупления инструментов из синтетических твердых материалов. При обработке большинства пластмасс и хрупких неметаллических материалов допускаемое затупление инструмента должно быть на 30—50% меньше, чем при резании тех же обрабатываемых материалов инструментами из других инструментальных материалов.

Износ режущей части фрез из различных инструментальных материалов заметно влияет на шероховатость обработанной поверхности. При обработке гетинакса Ш фрезами с режущими элементами из АСБ при оптимальных режимах можно получать поверхности шероховатостью $Rz = 5 \div 40$ мкм, а при обработке асбоцемента 400 $Rz = 40 \div 80$ мкм. По мере увеличения продолжительности работы фрезы шероховатость поверхности детали снижается.

При обработке почти всех материалов из-за прерывистости процесса фрезерования даже при высоких скоростях применять СОЖ не следует. Действие динамических нагрузок, усугубляемое ростом градиента температур, вызываемого СОЖ, приводит к образованию микро- и макротрещин у поликристаллов, их выкрашиванию или разрушению. Применение СОЖ допустимо только в тех случаях, если обеспечивается непрерывная ее подача на режущие кромки всех зубьев фрезы как за все время среза, так и за время холостого хода после выхода зуба из обрабатываемого материала.

§ 5.3. Режимы резания при точении и фрезеровании алмазами и эльбором

В табл. 5.13 приведены режимы резания для точения некоторых материалов алмазными резцами, а в табл. 5.14 для точения эльборовыми резцами.

В табл. 5.15 приведены также ориентировочные данные в отношении стойкости резцов из эльбора-Р.

Систематизированных режимов резания при фрезеровании различных материалов инструментами из сверхтвердых материалов пока еще нет. Имеющиеся

Таблица 5.13

Режимы резания при алмазном точени

Материал обрабатываемой детали	Марка алмаза *	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	*Ra*, мкм
Медь М-1	А	300—600	0,02—0,06	0,01—0,3	0,16—0,63
	АСП	300—600	0,02—0,1	0,01—1,0	0,32—1,25
Бронза оловянистая	А	300—600	0,02—0,06	0,01—0,3	0,16—0,63
	АСП	300—600	0,02—0,12	0,01—1,5	0,32—1,25
Латунь Л62	А	300—600	0,02—0,1	0,01—0,5	0,16—0,63
	АСП	300—600	0,02—0,12	0,01—1,5	0,32—1,25
Баббит	А	400—700	0,02—0,1	0,01—0,5	0,16—0,63
	АСП	400—700	0,02—0,12	0,01—1,5	0,32—1,25
Алюминий	А	400—600	0,02—0,06	0,01—0,3	0,16—0,63
	АСП	400—600	0,02—0,08	0,01—1,5	0,32—1,25
Дюралюминий Д16Т	А	400—600	0,02—0,06	0,01—0,3	0,16—0,63
	АСП	400—600	0,02—0,1	0,01—1,5	0,32—1,25
Оргстекло	А	500—700	0,02—0,06	0,01—0,3	0,16—0,63
	АСП	500—700	0,02—0,06	0,01—1,0	0,32—1,25
Гетинакс	А	400—800	0,05—0,14	0,01—0,5	0,16—0,63
	АСП	400—800	0,05—0,14	0,01—1,5	0,32—1,25
Стеклотекстолит	А	400—800	0,05—0,14	0,01—0,5	1,25—5
	АСП	400—800	0,05—0,14	0,01—1,5	1,25—5
Стеклопластик СВАМ	А	400—800	0,05—0,14	0,01—0,5	1,25—5
	АСП	400—800	0,05—0,14	0,01—1,5	1,25—5
Пластическая керамика	А	300—600	0,02—0,1	0,02—0,5	0,32—2,5
	АСП	300—600	0,02—0,12	0,02—1,5	0,32—2,5
Титановый сплав	А	100—300	0,02—0,06	0,01—0,03	0,32—2,5
	АСП	100—300	0,02—0,08	0,01—0,50	0,32—2,5

* А — природный алмаз; АСП — алмаз синтетический поликристаллический.

Таблица 5.1

Режимы резания при точении резцами из эльбора

Материал обрабатываемой детали	Режимы резания		
	Скорость резания, м/мин	Подача, мм/об	Глубина резания, мм
Стали:			
закаленные инструментальные (*HRC* 60)	70—90	0,04—0,07	0,05—0,25
закаленные конструкционные (*HRC* 50—60)	90—110	0,04—0,08	0,1—0,3
закаленные конструкционные (*HRC* 40—50)	120—150	0,04—0,1	0,2—0,5
Жаропрочные закаленные труднообрабатываемые сплавы типа ЭИ 616 (*HRC* 30—45)	120—150	0,04—0,1	0,2—0,5
Чугун:			
серый	500—600	0,04—0,15	0,2—0,6
высокопрочный	200—300	0,04—0,1	0,2—0,4
высокопрочный легированный	150—200	0,04—0,08	0,2—0,4

Таблица 5.15

Рекомендуемые режимы для точения закаленных сталей резцами из эльбора

Вид обработки	Скорость резания, м/мин	Продольная подача, мм/об	Глубина резания, мм	Средняя стойкость резцов, мин
Тонкое точение и растачивание	80—160	0,02—0,08	0,05—0,2	120—200
Чистовое и получистовое точение и растачивание	80—160	0,08—0,16	0,2—0,8	45—120
Черновое точение	60—120	0,16—0,20	0,9—2,0	30

Таблица 5.16

Допустимая глубина резания при торцовом фрезеровании в зависимости от главного угла в плане для ножей из различных синтетических сверхтвердых материалов

Материал инструмента	Глубина резания t, мм при главном угле в плане φ, град			
	30	45	60	90
АСБ	1,2—1,5	1,5—2,0	2,0—2,5	2,5—3,0
АСПК	0,7—1,0	1,0—1,5	1,5—2,0	1,5—2,0
ПКНБ	0,5—0,7	0,8—1,0	1,0—1,3	1,2—1,5

Таблица 5.17.

Рекомендуемые режимы резания при фрезеровании материалов торцовыми фрезами, оснащенными поликристаллами из АСБ

Материал обрабатываемой детали	v, м/мин	s_z, мм/зуб	t, мм
Медь Бронза Алюминий и его сплавы	250—400 300—600 400—500	0,01—0,15	До 1,0
Гетинакс Текстолит Древесностружечные плиты Фенопласты	Более 250	0,05—0,50	До 2,5
Слюдинит Стеклотекстолит Капрон Оргстекло	150—600		
Винипласт Полистирол Фторопласт	Более 200		
Асбестоцемент	150—650	0,05—0,35	До 2,5

Примечание. При износе h_3 более 0,2 мм скорость резания следует снизить до 80—150 м/мин.

сведения о режимах резания относятся в основном к области фрезерования неметаллических труднообрабатываемых материалов типа пластмасс с минеральными наполнителями, асбестоцемента и некоторых других.

В табл. 5.16 приведены данные о предельных глубинах резания при работе фрезами из различных синтетических сверхтвердых материалов.

Ниже приведена обобщенная формула для определения скорости резания в зависимости от стойкости, подачи и глубины резания при торцовом фрезеровании асбестоцемента 400 фрезой, оснащенной стандартными вставками из АСБ:

$$v = \frac{8{,}8 \cdot 10^6 K_B K_\varphi K_D}{T^{1.8} t^{0.09} s^{0.14}}.$$

Значения поправочных коэффициентов K_B, K_φ и K_D при условии, что $\alpha = \alpha_1 = 12°$; $\gamma = 5°$; $\varphi_1 = 15°$; $\lambda = 5°$; $r = 0{,}3$ мм; $h_з = 0{,}07$ мм, приведены ниже.

Ширина фрезерования B, мм	30	60	90	120
K_B	0,75	1,0	1,15	1,35
Главный угол в плане φ, град	30	45	60	
K_φ	1,15	1,10	1,00	
Диаметр фрезы D, мм	100	140	170	
K_D	1,00	1,42	1,17	

При фрезеровании цветных и легких сплавов, термореактивных и термопластичных пластмасс, строительных материалов и материалов на основе слюды режимы резания можно ориентировочно назначать согласно табл. 5.17.

Глава 6

ОТДЕЛОЧНО-УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА ДЕТАЛЕЙ АЛМАЗОМ И ДРУГИМИ СВЕРХТВЕРДЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

§ 6.1. Инструмент для выглаживания

Процесс отделочно-упрочняющей обработки деталей методом поверхностного пластического деформирования кристаллами алмаза или других сверхтвердых материалов получил широкое распространение как средство повышения эксплуатационных свойств деталей машин и приборов. Пластическое деформирование обрабатываемой поверхности осуществляется скользящим по ней инструментом с рабочей частью в виде выпуклой криволинейной поверхности. В результате сминания микронеровностей резко снижается шероховатость поверхности и упрочняется поверхностный слой металла. Алмазным инструментом можно выглаживать детали из всех пластичных металлов и сплавов практически любой твердости, исключая сплавы на основе титана; при выглаживании титановых сплавов может происходить налипание обрабатываемого материала на рабочую поверхность инструмента, что приводит к задирам и другим дефектам обработки.

Высокая эффективность выглаживания достигается при обработке высокопрочных и закаленных сталей твердостью *HRC* 60—65 (марок 40Х, ШХ15, Р18, 12ХН3А, 18ХГТ, 38ХМЮА, 07Х16Н6, 12Х2НВФА,) конструкционных сталей как в состоянии поставки, так и после термической обработки (марок 15, 20, 30, 40Х13, 12Х18Н9Т, 1Х18Н2АТ), цветных металлов и сплавов (АК6, инвара Н32, Д1Т, ЛС59-13, БрАЖ9-4Л), серого чугуна СЧ21-40 и других материалов.

Исходная шероховатость поверхности определяет эффективность процесса. При обработке незакаленных сталей, цветных металлов и сплавов исходная шероховатость поверхности должна быть $Ra = 2{,}5$ мкм. При более грубых поверхностях после обработки не происходит полного сминания гребешков микронеровностей. Эксперименты показывают, что закаленные стали целесообразно выглаживать при исходной шероховатости $Ra = 0{,}32 \div 0{,}63$ мкм. Исходная шероховатость поверхности может быть получена точением, шлифованием, хонингованием и другими методами обработки. Перед выглаживанием детали, обработанные шлифовальным инструментом, должны быть тщательно промыты и очищены от абразива. Остатки абразива на обрабатываемой поверхности резко снижают стойкость выглаживающего инструмента.

Алмазный выглаживающий инструмент (АВИ) представляет собой державку из стали (12ХН3А или 40Х) и закрепленного в ней кристалла алмаза. При изготовлении инструмента алмаз ориентируют таким образом, чтобы его обработка проходила в «мягком» направлении, а в процессе работы этим инструментом истирание происходило в «твердом» направлении, где, кроме того, значительно ниже коэффициент трения кристалла по металлической поверхности. На цилиндрической поверхности державки АВИ наносят риску, по которой определяют положение инструмента в работе, обеспечивающее истирание кристалла в «твердом» направлении. Кристалл, как правило, закрепляют в державке с помощью пайки серебряными припоями ПСр-40, ПСр-50Кд, имеющими низкую температуру плавления (600—650° С) и обладающими высокими механическими свойствами. Допускается применение латунного припоя марки ЛС59, Л62.

Рабочую поверхность АВИ выполняют обычно в виде цилиндра, сферы, кругового тора или конуса, для чего используют алмазы с кристаллами, имеющими форму ромбододекаэдра или октаэдра. АВИ со сферической рабочей поверхностью нормализованы (нормаль ВНИИАЛМАЗа ОН 037-103—67). В этой нормали предусмотрен инструмент с размерами радиуса сферы от 0,5 до 4 мм. В табл. 6.1 приведены конструкции и основные размеры инструмента с кони-

Таблица 6.1

Основные размеры выглаживающего инструмента

Форма рабочей поверхности	Конструкция алмазного выглаживающего инструмента	r	R, h	D	d	L	l	φ, град	Масса алмаза, карат
Тор		0,5	20	12	6	20	12	30	0,78—0,85
		1,0							
		1,5	1,5						
		2,0							
		2,5	1,0						
		3,0							
		3,5	0,5						
		4,0							
Цилиндр		0,5	3,0	10	6	20	12	30	0,41—0,6
		1,0							
		1,5	4,0						0,75—0,78
		2,0							
		2,5	4,5						0,78—0,83
		3,0							
		3,5	5,0						0,86—0,95
		4,0							
Сфера		0,5		10	6	20	12	30	0,21—0,3
		1,0							
		1,5							0,31—0,4
		2,0							
		2,5							0,41—0,6
		3,0							
		3,5		12	8	32	20	30	0,61—0,85
		4,0							
Сфера		0,5	—	—	8	20	—	30	0,21—0,3
		1,0							
		1,5							0,31—0,4
		2,0							
		2,5							0,41—0,6
		3,0							
Конус		—	—	10	6	20	12	45	

ческой, сферической, цилиндрической и тороидальной рабочими поверхностями. Инструмент со сферической рабочей поверхностью используют для выглаживания наружных, внутренних и торцовых поверхностей. Инструмент с цилиндрической рабочей поверхностью применяют для выглаживания только наружных поверхностей тел вращения. В процессе выглаживания образующую цилиндрического участка алмаза устанавливают под углом $\beta = 45 \div 90°$ к образующей обрабатываемого цилиндра. Лучших результатов выглаживания достигают при меньших значениях угла β. Инструмент с тороидальной рабочей поверхностью предназначен для выглаживания наружных, внутренних и торцовых поверхностей. В процессе выглаживания инструмент с тороидальной рабочей поверхностью образует пятно контакта с деталью в виде эллипса. Инструмент устанавливают относительно детали таким образом, чтобы большая ось эллиптического пятна контакта располагалась в направлении подачи или в направлении главного движения. При обработке вязких сталей и цветных металлов предпочтительно расположение длины площадки контакта в направлении подачи. При обработке высокопрочных и закаленных сталей для повышения удельного давления ориентируют ширину пятна контакта в направлении подачи. Инструмент с конической рабочей поверхностью можно применять только для выглаживания наружных поверхностей тел вращения.

Для изготовления выглаживающего инструмента помимо натуральных алмазов используют синтетические алмазы (баллас, карбонадо), а также синтетический корунд (рубин и лейкосапфир), минералокерамику и твердые сплавы. Наиболее износоустойчив инструмент из природных алмазов. Значительно меньший период стойкости у инструмента из балласа, синтетических корундов и твердых сплавов. Зависимость стойкости алмазного выглаживающего инструмента от материала и размеров рабочей части приведена в табл. 6.2 [5, 21, 28, 32, 101, 111].

Таблица 6.2

Стойкость алмазного выглаживающего инструмента в километрах рабочего пути

Материал рабочей части инструмента	Радиус рабочей поверхности, мм	Материал обрабатываемой детали	Стойкость	
			Пройденный путь L, км	Машинное время, ч
Природный алмаз	1,2	Сталь:		
		45 (HRC 45—50)	150—180	25—30
	1,2	45 (HRC 52—62)	324—648	19—38
	2,0	ШХ15 (HRC 60—62)	70—80	12—13
	2,5—3,0	20	180—270	—
	3,2	СЧ 21-40	58—72	8—10
Синтетический алмаз—баллас	1,3—1,6	ШХ15 (HRC 58—62)		
	—	20ХГР (HRC 58—64)	50	—
	2,2—3,5	Чугун (HRC 207—302)	75	—
	2,2—3,5	БрОЦС 3-12-5	150—200	—
	2,0	ШХ15 (HRG 60—62)	70—80	12—13
Лейкосапфир	—	40Х13	18—34	6—12
Рубин	—	Д16Т	15—27	5—9
Твердый сплав:				
Т15К6	8	40Х (HB 250)	—	2,5—3
Т30К4	8		—	6—7

В процессе выглаживания на рабочей поверхности инструмента образуется площадка износа, на поверхности которой наблюдаются риски или отдельные сколы и микровыкрашивания. Характер и интенсивность износа определяют в зависимости от формы и размеров рабочей поверхности инструмента, формы кристалла, режима обработки (рис. 6.1 и 6.2). На интенсивность износа оказывает влияние температура на поверхности контакта, особенно в диапазоне свыше 700—750° С. При таких температурах рабочий участок алмаза разрушается, и инструмент начинает царапать поверхность детали, в зоне выглаживания скапливается микроскопическая стружка, резко ухудшается качество обработки, поэтому при назначении режимов обработки радиальная сила и особенно скорость выглаживания должны быть выбраны с таким расчетом, чтобы температура на контактной поверхности инструмента не превышала для кристалла алмаза опасного предела.

Основным критерием затупления алмазного инструмента является шероховатость обработанной поверхности. При превышении допустимой шероховатости в зону обработки путем перестановки (поворота) инструмента вводят новый неизношенный участок рабочей поверхности. Число таких перестановок зависит от размеров и формы рабочей поверхности инструмента, а также от положения его относительно детали в процессе выглаживания (табл. 6.3).

Стойкость инструмента со сферической, тороидальной и конусной формами рабочей поверхности, может быть увеличена в десятки раз, если в процессе выглаживания сообщить инструменту вращение вокруг оси державки. При таком способе выглаживания в процессе работы из зоны контакта непрерывно выходят нагретые участки рабочей поверхности инструмента, которые отдают тепло в окружающую среду (СОЖ), и охлажденные вновь поступают в рабочую зону. При этом температура выглаживания резко снижается, улучшаются условия смазки, увеличивается активный участок рабочей поверхности, что приводит к значительному увеличению периода стойкости инструмента.

Радиус рабочей поверхности инструмента выбирают главным образом в зависимости от обрабатываемого материала. Чем тверже обрабатываемый материал, тем меньше должен быть радиус инструмента, что необходимо для создания определенного удельного давления в зоне деформации. Ниже приведены применяемые на практике радиусы рабочей поверхности инструмента в зависимости от качества и твердости обрабатываемого материала.

Обрабатываемый материал	Радиус инструмента, мм
Закаленные стали *HRC* 60—64	1,0—1,5
Закаленные стали *HRC* 35—60	1,5—2,5
Конструкционные стали в состоянии поставки	2,0—3,5
Цветные металлы и сплавы	3,0—4,0

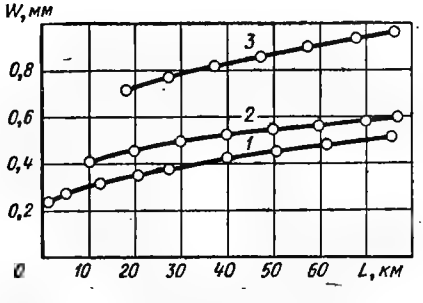


Рис. 6.1. Зависимость диаметра площадки износа W от пути скольжения L:

1 — износ ромбододекаэдра; *2* — октаэдра (при обработке стали ШХ15); *3* — ромбододекаэдра (при обработке стали 40Х)

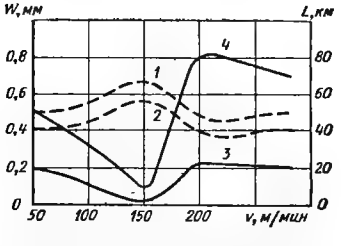


Рис. 6.2. Зависимость диаметра площадки износа W и пути скольжения L от скорости выглаживания:

1 — после $L = 20$ км; *2* — после $L = 6$ км; *3* — путь скольжения L при $W = 0{,}4$ мм; *4* — путь скольжения L при $W = 0{,}5$ мм

Таблица 6.3

Способы ориентации АВИ относительно детали

Форма рабочей поверхности инструмента	Схема установки	Схема переустановок	Форма рабочей поверхности инструмента	Схема установки	Схема переустановок
Тор			Сфера		
Цилиндр			Конус		

Процесс изготовления алмазного выглаживающего инструмента состоит из следующих основных операций: аттестация алмазного сырья, крепление кристаллов в державке и обработка алмаза. При изготовлении инструмента с рабочей частью в виде участка сферы или тора алмаз последовательно шлифуют до образования конической, сферической или тороидальной поверхности на специализированном оборудовании при помощи алмазных кругов и чугунных дисков, шаржированных алмазными порошками. При изготовлении инструмента с цилиндрической рабочей поверхностью обработку алмаза начинают с боковых поверхностей, затем гранят вершину, делают фацетки с последующим шлифованием и доводкой участка поверхности цилиндра.

Заточку и доводку алмазного выглаживающего инструмента можно осуществлять на универсально-заточном станке с помощью специального приспособления. Конструкция приспособления показана на рис. 6.3. Приспособление базируют на плите *1*, в которой с помощью втулок *2* и *3* вмонтирован переходник *4*. Все механизмы приспособления смонтированы в корпусе *5*, который болтами закреплен на переходнике. Привод механизмов вращательного движения шпинделя и качательного движения корпуса приспособления осуществляется непосредственно от шпинделя заточного станка с помощью специальной оправки *6* с гибким валом *7*. Алмаз обрабатывают нижней частью шлифовального круга, положение инструмента относительно которого в процессе возвратно-качательного движения корпуса будет изменяться, обеспечивая равномерную

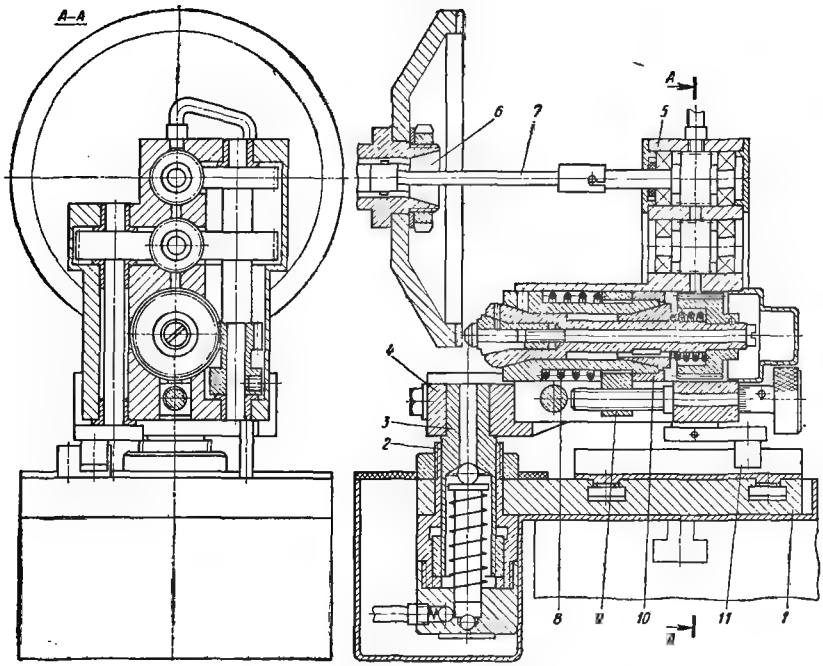


Рис. 6.3. Заточное приспособление (полуавтомат) для восстановления рабочей поверхности алмазного выглаживающего инструмента

выработку по всей плоскости алмазоносного слоя за счет резьбового соединения между втулками *2* и *3*. Это же движение используется для привода плунжерного насоса, с помощью которого осуществляют смазку механизмов приспособления.

Для заточки инструмента со сферической рабочей поверхностью оси вращения инструмента и возвратно-качательного движения располагают в одной плоскости, затем с помощью калибра и механизма осевого перемещения шпинделя устанавливают заданный радиус затачиваемой сферы (рис. 6.4). Угол качания корпуса при заточке сферы может быть равен центральному углу сферы; тогда возвратно-качательное движение должно совершаться симметрично относительно положения, при котором ось инструмента нормальна рабочей плоскости круга. Более целесообразно качание инструмента осуществлять из среднего положения на угол φ только в одну сторону, при этом угол качания уменьшается в 2 раза и соответственно уменьшается эксцентриситет кривошипа. Величина эксцентриситета может быть вычислена по формуле

$$e = \frac{H \sin(\varphi + \gamma) - h}{2},$$

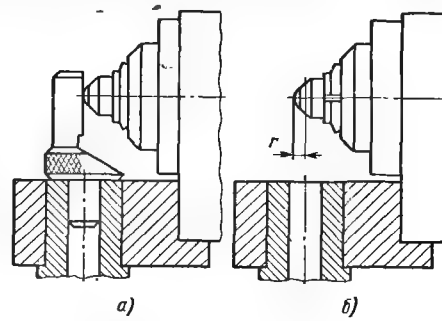


Рис. 6.4. Схема установки инструмента в приспособлении:

а — по калибру ($r = 0$); *б* — на заданный радиус рабочей поверхности

где H — расстояние от оси качания корпуса до оси вращения кривошипа; h — расстояние от оси вращения инструмента до оси вращения кривошипа; $\gamma = \arcsin \frac{h}{H}$ — угол между плоскостью, в которой расположены оси качания корпуса и ось вращения инструмента, и осью вращения кривошипа.

Во время заточки прижим инструмента к шлифовальному кругу осуществляется пружиной *8* (см. рис. 6.3), при этом между кольцом *9* и втулкой *10* образуется зазор, величина которого соответствует припуску на заточку. Для заточки инструмента с тороидальной рабочей поверхностью используют вращательное и качательное движения инструмента, но при этом оси вращения инструмента и возвратно-качательного движения должны располагаться в параллельных плоскостях на расстоянии радиуса R тора. Качательное движение осуществляется из нормального положения в одну сторону. Эксцентриситет кривошипа

$$e = \frac{H \sin(\varphi + \gamma) + R - h}{2}$$

устанавливают путем соответствующей перестановки пальца *11*. При заточке инструмента с конусной рабочей поверхностью отключают качательное движение ($e = 0$), а с цилиндрической — отключают вращательное движение инструмента. В последнем случае качательное движение должно осуществляться из среднего положения в обе стороны.

Заточку инструмента ведут в несколько переходов. Черновую заточку осуществляют алмазным кругом АЧК 150×10×3×32 зернистостью АСП10, АСВ10 100%-ной концентрации на металлической связке М1; частота вращения шлифовального шпинделя равна 3000 об/мин. Припуск на переточку инструмента равен 0,15—0,20 мм. Шероховатость поверхности после заточки должна быть $Ra = 2{,}5 \div 5$ мкм. Для получистовой заточки применяют мелкозернистые алмазные круги из природных или синтетических алмазов 100%-ной концентрации, связка металлическая М1. Для чистовой заточки зернистость круга не должна превышать АСМ28. Припуски на получистовую и чистовую заточку соответственно равны 0,02—0,03 и 0,01—0,15 мм. Шероховатость поверхности должна соответствовать $Ra = 0{,}32 \div 0{,}64$ мкм после получистовой и $Ra = 0{,}08 \div 0{,}16$ мкм после чистовой заточки. Окончательно инструмент обрабатывают чугунным кругом (СЧ 21-40) с плотной структурой, рабочую поверхность которого шаржируют алмазным порошком АСМ3—АСМ5. Шероховатость поверхности после доводки должна быть $Ra = 0{,}02 \div 0{,}04$ мкм. При заточке и доводке торцовое биение рабочей поверхности круга не должно превышать соответственно 0,003 и 0,01 мм.

§ 6.2. Методы выглаживания алмазным инструментом

Выглаживание поверхностей тел вращения можно осуществлять на универсальном оборудовании (токарных, сверлильных и расточных станках) с соответствующей кинематикой процесса или на специальных алмазно-выглаживающих станках. При выглаживании на станках токарной группы детали устанавливают и закрепляют, как при точении, — в центрах, в патроне или на оправке. В процессе обработки алмазным инструментом окружная сила обычно не превышает 1—2 кгс, поэтому передача вращения детали при закреплении ее в центрах, как правило, осуществляется без поводка. Для закрепления деталей без центровых отверстий можно использовать их торцы или применить метод бесцентрового выглаживания.

На рис. 6.5 показано устройство для бесцентровой отделочно-упрочняющей обработки коротких цилиндрических деталей на токарном станке. Устройство состоит из ведущей скалки *1*, которую устанавливают и закрепляют в центрах станка, и приводных валков *2* и *3*, смонтированных на подшипниках качения в корпусе *4*. Последний плоскими пружинами *5* соединен с зажимом *6*, посред-

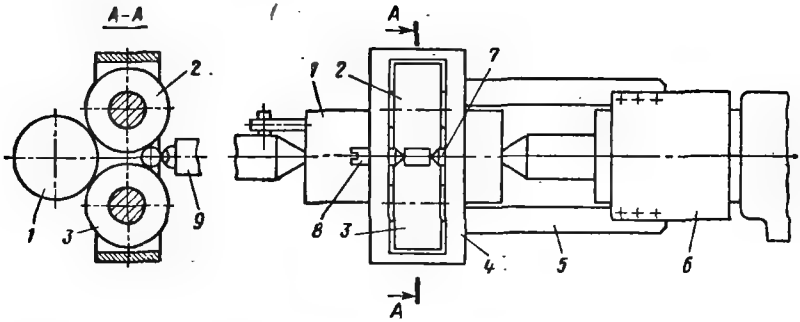


Рис. 6.5. Устройство для бесцентровой отделочно-упрочняющей обработки на токарном станке

ством которого корпус закрепляют на пиноли задней бабки станка. Обрабатываемую деталь устанавливают между приводными валками и фиксируют в этом положении упором *7* и установочным винтом *8*. В процессе выглаживания деталь прижимается инструментом *9* к приводным валкам, а последние — к ведущей скалке, в результате чего вращение скалки за счет сил трения передается приводным валкам и обрабатываемому ролику.

Процесс выглаживания можно осуществлять с жестким или упругим закреплением инструмента. При обработке с жестким закреплением инструмента заранее устанавливают глубину выглаживания $t = (1{,}1 \div 1{,}3)\ Rz'$, величина которой зависит от материала и состояния обрабатываемой поверхности, высоты шероховатостей исходной поверхности Rz', а также геометрических параметров инструмента. В этом случае обработку необходимо проводить на станках повышенной жесткости и точности. Опытные данные показывают, что при выглаживании с жестким закреплением инструмента происходит исправление погрешностей геометрической формы детали. В большинстве случаев возможное исправление геометрической формы происходит в пределах высот исходных микронеровностей. При пластических деформациях, вызывающих изменение формы за пределами величины исходных микронеровностей, возможно получение поверхности неоднородной как по шероховатости, так и по упрочнению поверхностного слоя. Для снижения неоднородности упрочненного слоя выглаживание иногда целесообразно проводить в одну установку с предшествующей операцией, помещая выглаживающий инструмент сразу за режущим.

При обработке с упругим закреплением инструмента заранее устанавливают не глубину выглаживания, а радиальную силу, с которой он прижимается к обрабатываемой поверхности. Используемые для этой цели специальные упругие державки должны обеспечивать постоянство радиальной силы даже при вынужденных поперечных перемещениях инструмента, вызванных возможным радиальным биением обрабатываемой поверхности, непараллельностью образующей детали направлению подачи, или при необходимости обработки конусных и фасонных поверхностей. На рис. 6.6 показаны конструкции державок для упругого выглаживания наружных поверхностей. Радиальная сила создается тарированной пружиной или упругой частью корпуса державки. Державка (рис. 6.6, *а*) состоит из корпуса *1*, в котором по посадке движения установлена инструментальная оправка *2*. С другой стороны корпуса в отверстии крышки *3* установлен винт *4* с гайкой *5*. Между последней и инструментальной оправкой расположена пружина *6*. На корпусе державки нанесены риски, соответствующие определенным величинам радиальной силы. Необходимую радиальную силу выглаживания (силу сжатия пружины) устанавливают вращением винта *4*, при этом риску на шпонке *7* совмещают с соответствующей риской на корпусе державки. В процессе выглаживания державка, закрепленная в резцедержателе станка, должна быть установлена таким образом, чтобы между опорным торцом инструментальной оправки и корпусом державки образовался зазор (перебег инструмента)

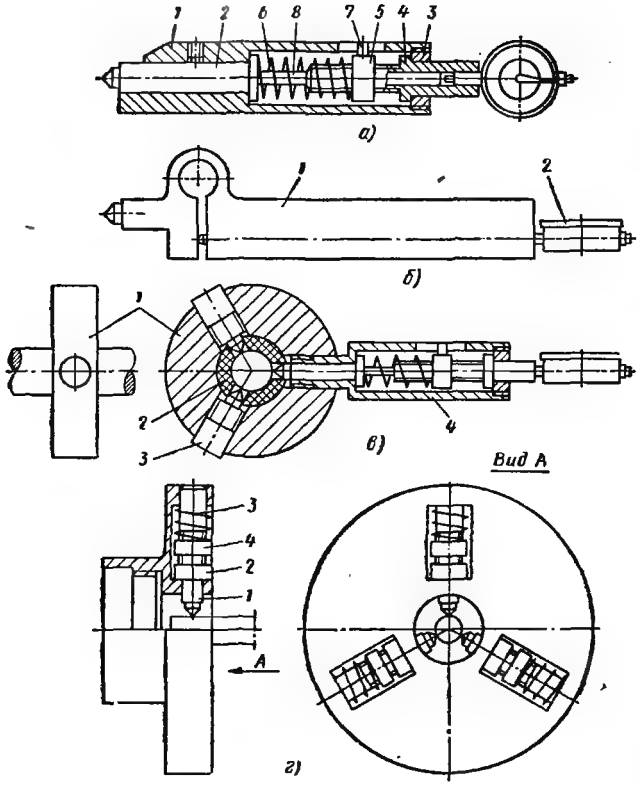


Рис. 6.6. Конструкция державок для выглаживания наружных поверхностей:

а, б — упругие державки; *в, г* — многоинструментальные головки

величиной 0,05—0,1 мм. Индикатор, закрепленный в отверстии винта *4* и соединенный посредством штока *8* с инструментальной оправкой, предназначен для измерения величины перебега и фиксации начала и конца обработки.

На рис. 6.6,*б* показана державка, в которой сила прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности обеспечивается деформацией упругой части корпуса *1*. Величину радиальной силы контролируют отградуированным индикатором *2*. Недостатком такой державки является повышенная чувствительность к биению обрабатываемой поверхности, которое вызывает колебания радиальной силы в более широких пределах, чем при работе с пружинной державкой.

Многоинструментальная головка (рис. 6.6, *в*) предназначена для отделочно-упрочняющей обработки длинных валов, штоков и других маложестких цилиндрических деталей, когда одностороннее приложение радиальной силы недопустимо. Головка состоит из корпуса *1*, фторопластовой направляющей втулки *2*, двух жестких державок *3* и упругой державки *4*. В процессе выглаживания детали сообщается вращение, а инструментальной головке осевое перемещение. На рис. 6.6, *г* показана многоинструментальная головка, которой в процессе выглаживания сообщается вращательное движение; обрабатываемой детали сообщается движение подачи. Головку закрепляют на шпинделе станка.

Установку инструмента на заданный диаметр обработки осуществляют по калибру осевым перемещением инструментальной оправки *1* с помощью гайки *2*. Радиальную силу выглаживания устанавливают сжатием пружины *3* гайкой *4*.

Пружинные державки используют и для обработки внутренних поверхностей. На рис. 6.7 показаны конструкции таких державок, где радиальную силу задают с помощью тарированной пружины растяжения (рис. 6.7, *а*) или сжатия (рис. 6.7, *б*).

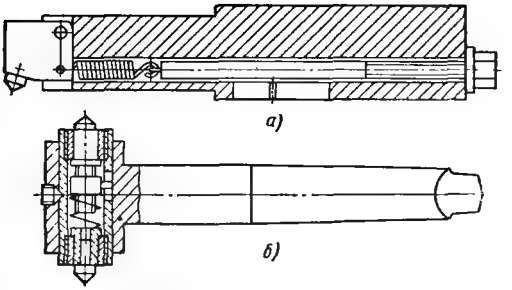


Рис. 6.7. Конструкция державок для выглаживания внутренних поверхностей:

а — односторонняя; *б* — двусторонняя

При отделочно-упрочняющей обработке инструментами с тороидальной, а также конической или сферической рабочей поверхностью наиболее полное использование кристалла алмаза может быть достигнуто, если ему сообщить дополнительно вращательное движение. На рис. 6.8 показан один из вариантов конструкции пружинной державки, в которой для вращения инструмента в качестве привода используют обрабатываемую деталь. Инструмент закрепляют на специальной оправке-шестерне *1*, зацепляющейся с червяком *2*, смонтированным в упругом кронштейне *3*. При вращении детали *4*, за счет сил трения приводится в движение червяк, а затем и инструментальная оправка с выглаживающим инструментом.

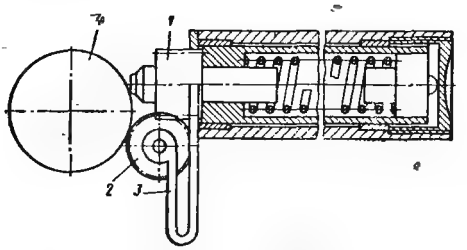


Рис. 6.8. Пружинная державка для выглаживания вращающимся инструментом

§ 6.3. Качество и точность деталей при отделочно-упрочняющей обработке

Шероховатость. Поверхность, выглаженная алмазным инструментом, отличается округлой формой микронеровностей и имеет характерный зеркальный блеск. При упругом закреплении инструмента наибольшее влияние на высоту микронеровностей оказывает удельное давление в зоне обработки, а при жестком выглаживании — глубина внедрения инструмента. Сравнительно небольшое изменение радиальной силы при данном радиусе рабочей поверхности инструмента вызывает значительное снижение высоты исходных микронеровностей (рис. 6.9). По мере смятия гребешков микронеровностей и упрочнения поверхностного слоя сопротивление деформации увеличивается, поэтому наименьшая величина шероховатости достигается после наиболее полного заполнения микропрофиля и упрочнения поверхностного слоя, что соответствует оптимальному значению радиальной силы или глубине внедрения инструмента. Последние величины зависят также от обрабатываемого материала, его твердости, формы и размеров инструмента. Шероховатость выглаженной поверхности зависит и от других параметров процесса (рис. 6.10): величины подачи, числа проходов, скорости обработки, исходной шероховатости и т. п. При обработке

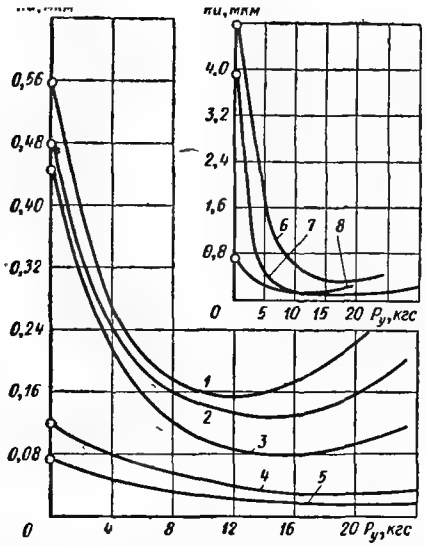


Рис. 6.9. Зависимость шероховатости Ra от радиального усилия P_y при выглаживании:

1, 2, 6 — стали соответственно 18ХГТ (*HRC* 60), 45 (*HRC* 54), ШХ15 (*HRC* 60), $r = 1{,}2$ мм; $s = 0{,}03$ мм/об; *4* — стали ШХ15 (*HRC* 62—64), $r = 1{,}0$ мм; $s = 0{,}005$ мм/об; *5* — стали ШХ15 (*HRC* 62—64), $r = 0{,}9$ мм цилиндрическая форма); $s = 0{,}005$ мм/об; (*6, 7, 8* — соответственно Бр.ОФ6,5-0,15, стали 12Х18Н9, стали 45 (*HB* 173—180), $r = 3{,}4$ мм; $s = 0{,}078$ мм/об

закаленных сталей 45, ШХ15, Р18, цементованной стали 18ХГТ (*HRC* 50—65) высота неровностей после выглаживания может быть рассчитана по формуле

$$Ra = 0{,}52\,\frac{s^{0,4}v^{0,12}}{i^{0,3}}\,Ra_{исх}^{1,05},$$

где i — число проходов; $Ra_{исх}$ — высота неровностей на исходной поверхности, мкм; $s = 0{,}02 \div 0{,}08$ — подача, мм/об; v — скорость выглаживания (при $v < 60$ м/мин в формулу подставляют значение $v = 60$), м/мин.

Эта шероховатость получена при оптимальном значении радиальной силы P_y, которую рассчитывают по формуле (6.1).

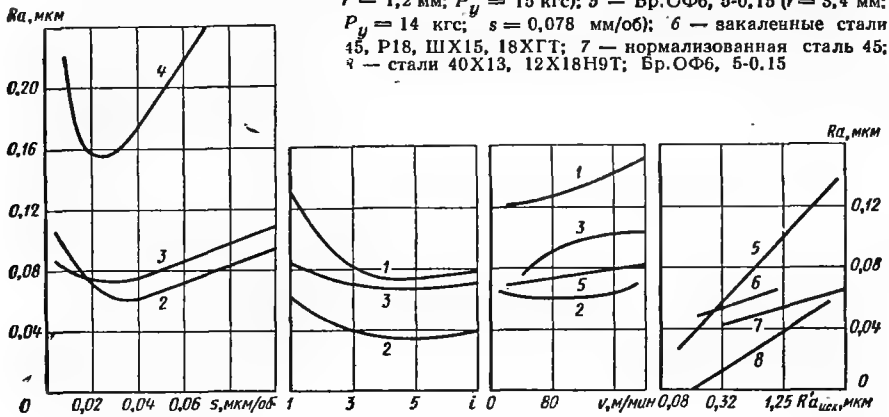
Микроструктура. В процессе выглаживания алмазным инструментом происходит дробление зерен и кристаллов обрабатываемого материала. Беспорядочно ориентированные зерна кристаллов дробятся и вытягиваются в направлении деформации, образуя мелкозернистую волокнистую структуру упрочненной поверхности. В результате отделочно-упрочняющей обработки некоторых материалов наблюдается изменение фазового состава упрочненной поверхности. Так, рентгеноструктурное исследование фазового состава поверхностного слоя закаленной стали ШХ15 [111] показало, что в процессе алмазного выглаживания происходит распад остаточного аустенита (рис. 6.11). Интенсивность этого процесса определяется главным образом удельным давлением в очаге деформации. При выглаживании стали 45 фазовых изменений не наблюдалось.

Упрочнение. Выглаживание алмазным инструментом вызывает значительное (20—35%) упрочнение поверхностного слоя. Исследование микротвердости на косых шлифах показывает, что величина и характер упрочнения зависят от радиальной силы. Так, для закаленной подшипниковой стали наибольшее значение микротвердости (1250—1300 кгс/мм²) достигается при удельных давлениях, при которых наблюдается наиболее полное сминание гребешков микронеровностей. Аналогичное явление происходит при обработке других материалов. После достижения максимальной величины микротвердости способность поверхностного слоя к упрочнению снижается. Глубина залегания упрочненного слоя зависит от радиальной силы, формы и размеров инструмента и может достигать 0,20—0,30 мм.

Остаточные напряжения. В процессе отделочно-упрочняющей обработки алмазным инструментом в поверхностном слое детали возникают остаточные, как правило, сжимающие напряжения. Опытные данные показывают, что величина и характер распределения остаточных напряжений по глубине упрочненного слоя во многом определяются удельным давлением в очаге деформации и формой рабочей поверхности инструмента (рис. 6.12). При выглаживании инструментом со сферической рабочей поверхностью эпюры остаточных напряжений имеют характерную петлевидную форму с минимумом сжимающих напряжений вблизи поверхностного слоя (кривые *1* и *2*). С увеличением скорости обработки

Рис. 6.10. Зависимость шероховатости Ra от подачи s, числа проходов i, скорости выглаживания v и исходной шероховатости $R'a$:

1, 2 — сталь 45 соответственно *HRC* 54 (r = 1,2 мм; P_y = 14 кгс) и *HB* 180 (r = 3,4 мм; P_y = 14 кгс); *3* — ШХ15 (*HRC* 60; r = 1,0 мм; P_y = 12 кгс); *4* — 18ХГТ (*HRC* 60—61; r = 1,2 мм; P_y = 15 кгс); *5* — Бр.ОФ6, 5-0,15 (r = 3,4 мм; P_y = 14 кгс; s = 0,078 мм/об); *6* — закаленные стали 45, Р18, ШХ15, 18ХГТ; *7* — нормализованная сталь 45; *8* — стали 40Х13, 12Х18Н9Т; Бр.ОФ6, 5-0.15



или при увеличении радиальной силы абсолютное значение напряжений у поверхности снижается. Другую форму имеют эпюры напряжений при обработке выглаживающим инструментом с цилиндрической рабочей поверхностью (кривые *3* и *4*). Максимум напряжений возникает вблизи поверхностного слоя детали, причем характер эпюр не изменяется даже при весьма напряженных условиях обработки. Различие в форме эпюр напряжений объясняется условиями темпе-

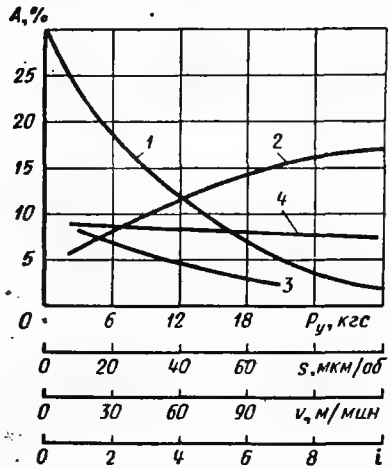


Рис. 6.11. Зависимость доли остаточного аустенита A в поверхностном слое стали ШХ15 (*HRC* 60—62) от режимов выглаживания:

1 — силы P_y; *2* — подачи s; *3* — числа проходов i; *4* — скорости обработки v

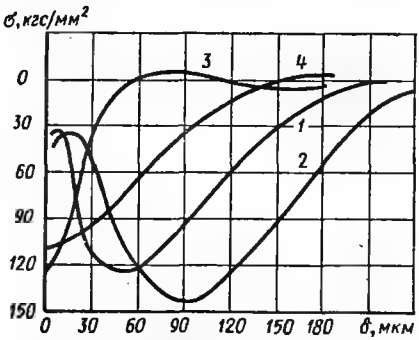


Рис. 6.12. Зависимость остаточных напряжений сжатия σ на различной глубине упрочненного слоя δ от радиальной силы P_y и формы рабочей поверхности инструмента при выглаживании стали ШХ15 (*HRC* 62—64) со скоростью v = 47 м/мин и подачей s = 0,005 мм/об:

1 — сфера (v = 1,0 мм; P_y = 20 кгс; v = 94 м/мин); *2* — сфера (r = 1,0 мм; P_y = 35 кгс); *3* — цилиндр (r = 0,9 мм; P_y = 15 кгс); *4* — цилиндр (r = 0,9 мм; P_y = 40 кгс)

Таблица 6.4

Износостойкость деталей при различных методах обработки

Материал обрабатываемой детали	Метод окончательной обработки	Износ приработки, мкм	Продолжительность приработки, мин	Интенсивность установившегося износа, ($\times 10^{-8}$) мкм/м
Сталь 45, *HB* 180	Тонкое шлифование Полирование Алмазное выглаживание	10 3 2,5	100 70 60	36 34 24
Сталь 45, *HRC* 56	Тонкое шлифование Полирование Алмазное выглаживание	7 3 2,5	130 80 70	80 70 24
Сталь 40Х, *HRC* 58	Тонкое шлифование Алмазное выглаживание	3 2	130 120	45 19
Сталь 18ХГТ цементованная, *HRC* 61	Тонкое шлифование Алмазное выглаживание	3 2	120 80	40 25
Сталь 12Х2Н4А цементованная, *HRC* 61	Тонкое шлифование Алмазное выглаживание	3,5 2,5	110 70	70 25

ратурно-силового воздействия в очаге деформации при обработке инструментом с цилиндрической или сферической рабочей поверхностью.

Износостойкость. Повышение микротвердости выглаженной поверхности, ее микрорельеф, а также образование в поверхностном слое благоприятных внутренних напряжений приводят к повышению износостойкости по сравнению с другими методами обработки аналогичной поверхности. Результаты сравнительных испытаний износостойкости шлифованных, полированных и выглаженных образцов шероховатостью $Ra = 0{,}16$ мкм в условиях трения-скольжения с бронзовыми вкладышами (скорость трения 2 м/с, давление в трущейся паре 60 кгс/см^2, смазка — масло индустриальное 20) приведены в табл. 6.4.

Износостойкость поверхности зависит от режимов выглаживания. Наименьший износ наблюдается при выглаживании с удельным давлением, обеспечивающим наименьшую шероховатость и наибольшее упрочнение поверхностного слоя.

Контактная выносливость. Результаты стендовых испытаний на контактную выносливость образцов из стали ШХ15 твердостью *HRC* 58—63 и роликоподшипника 32211Д2Т2 приведены в табл. 6.5 и 6.6 [101]. Наружную поверхность образцов и внутренних колец роликоподшипников после выглаживания обрабатывали полированием, суперфинишем и алмазным выглаживанием. Критерием оценки долговечности как при 10% (T_{10}), так и при 50% (T_{50}) вероятности являлось количество часов работы до появления усталостного выкрашивания (контактные напряжения образцов 500—550 кгс/мм^2, радиальная нагрузка подшипника 1952 кгс, частота вращения внутреннего кольца 2000 об/мин.).

Усталостная прочность. Алмазное выглаживание является эффективным средством повышения усталостной прочности деталей при работе как на воздухе, так и в коррозионной среде (табл. 6.7), что объясняется главным образом, благоприятной формой микрорельефа и остаточными напряжениями сжатия в упрочненном слое деталей.

Таблица 6.5

Контактная выносливость при различных методах обработки

Твердость образцов	Метод обработки	Контактная выносливость образцов, млн. циклов		Контактная выносливость, %	
		T_{10}	T_{50}	T_{10}	T_{50}
HRC 62—63	Выглаживание:				
	P_y = 9 кгс	24,3	106,3	246	143
	P_y = 12 кгс	21,9	61,3	220	82
	P_y = 18 кгс	12,2	65,2	122	88
	P_y = 24 кгс	13,6	52,0	137	70
	Суперфиниширование	9,9	74,6	100	100
	Полирование	6,6	70,3	67	94
HRC 58—59	Выглаживание при P_y = = 12 кгс	27,7	313—2	250	370
	Суперфиниширование	11,2	84,6	100	100

Таблица 6.6

Долговечность подшипников при различных методах обработки

Метод обработки	Долговечность подшипников				
	минимальная, ч		в процентах к минимальной		в процентах к расчетной ($T_{расч}$ = = 46 ч)
	T_{10}	T_{50}	T_{10}	T_{50}	T_{10}
Суперфиниширование	84,3	732,8	100	100	183
Выглаживание:					
P_y = 5 кгс	240,6	1357	285	185	520
P_y = 12 кгс	708,1	2218,0	840	300	1530

Таблица 6.7

Усталостная прочность при выглаживании

Характеристика образцов из стали 35ХН1М	Предел выносливости				
	на воздухе, кгс/мм²	в воде (кгс/мм²) при числе циклов испытаний			
		$0,2 \cdot 10^6$	$0,3 \cdot 10^6$	$0,5 \cdot 10^6$	$1,0 \cdot 10^6$
Неупрочненные	52	13	12	10	—
Упрочненные	59	38	35	32	23

Точность размеров и геометрической формы. Точность выглаживания зависит от способа отделочно-упрочняющей обработки. При выглаживании с упругим закреплением инструмента точность формы и поле рассеяния размеров практически остаются исходными. Изменение размеров детали может происходить в пределах высоты микронеровностей, поэтому необходимая точность деталей должна быть обеспечена на предыдущих операциях.

При выглаживании с жестким закреплением инструмента точность геометрической формы деталей несколько улучшается. При оптимальных режимах обработки исправление некруглости и непрямолинейности происходит в среднем на 50%, а овальности и конусности на 15—25% [30].

§ 6.4. Режимы отделочно-упрочняющей обработки алмазным инструментом

Режимы выглаживания (радиальная сила, подача, скорость обработки) зависят от ряда параметров процесса: механических свойств обрабатываемой поверхности, исходной шероховатости поверхности, способа отделочно-упрочняющей обработки, геометрии и размеров инструмента, радиальной силы, подачи, скорости обработки, смазывающе-охлаждающей жидкости.

Радиальная и окружная силы. Оптимальное значение радиальной силы соответствует условию полного смятия микронеровностей и упрочнению поверхностного слоя. Чрезмерные радиальные силы приводят к перенаклепу и резкому ухудшению качества обработки. Величина радиальной силы находится в пределах 5—30 кгс. При обработке закаленных сталей 45, ШХ15, Р18, цементованной стали 18ХГТ (*HRC* 50—65) оптимальное значение радиальной силы может быть рассчитано по формуле

$$P_y = 0{,}013HV\left[\frac{Dr}{D+r}\right]^2, \qquad (6.1)$$

где HV — твердость обрабатываемой поверхности по Виккерсу, кгс/мм²; D — диаметр обрабатываемой поверхности, мм; r — радиус рабочей части инструмента, мм.

Зависимость окружной силы P_z от радиальной силы P_y для некоторых сталей приведена в табл. 6.8.

Окружную силу P_z можно определить исходя из предпосылки, что площадь контакта инструмента с деталью состоит из зоны площади контакта, где возникает внешнее трение (в этой области касательные напряжения пропорциональны нормальным напряжениям), и зоны площади контакта, подвергнутой пластическим деформациям, где касательные напряжения сохраняют постоянное значение. Если закон распределения нормальных напряжений описывается уравнением Герца [90] и известны участки площади контакта с пластическими и упругими деформациями, то сила трения на площади контакта, или окружная

Таблица 6.8

Расчет сил при выглаживании

Материал обрабатываемой детали	Форма рабочей поверхности	Расчетная формула
ШХ15, *HRC* 60—62	Цилиндр	$P_z = 0{,}065P_y - 0{,}400$
ШХ15, *HRC* 60—62	Сфера	$P_z = 0{,}085P_y - 0{,}425$
Х12Н20Т3Р, *HRB* 302—388	»	$P_z = 0{,}087P_y - 0{,}365$
07Х16Н6, *HRC* 40—42	»	$P_z = 0{,}080P_y - 0{,}340$
12Х2НВФА, *HRC* 60—62	»	$P_z = 0{,}062P_y - 0{,}180$

сила выглаживания, может быть определена интегрированием касательных напряжений по всей площади контакта инструмента с деталью. В этом случае

$$P_z = \mu P_y (1 - \varepsilon^4),$$

где μ — коэффициент трения контактируемых материалов; $\varepsilon = R_0/R$; R — радиус площади контакта сферического участка рабочей поверхности инструмента с деталью; R_0 — радиус участка площади контакта, подверженного пластическим деформациям.

Для эллиптического пятна контакта

$$R = \sqrt{lb}; \quad R_0 = \sqrt{l_0 b_0},$$

где l и b — размеры эллипса пятна контакта; l_0 и b_0 — размеры эллиптического участка площади контакта, находящегося в пластически деформированном состоянии.

Подача. В практике выглаживания алмазным инструментом применяют подачи в диапазоне 0,01—0,10 мм/об. Как правило, чем меньше величина подачи, тем выше качество обработанной поверхности.

Обычно выглаживание производят за один проход. Многопроходное выглаживание производят при реверсировании направления подачи и непрерывном вращении детали. Чрезмерно малые значения подач (менее 0,005—0,01 мм/об), а также большое число проходов могут снизить качество обработки вследствие перенаклепа поверхности.

Скорость обработки. Окружная скорость выглаживания в диапазоне 10—300 м/мин оказывает незначительное влияние на шероховатость и качество поверхностного слоя. При скоростях обработки более 300—350 м/мин качество поверхности снижается, на поверхности появляются цвета побежалости, что является следствием высоких контактных температур. Высокие контактные температуры резко снижают стойкость инструмента, особенно инструмента со сферической рабочей поверхностью. Значительные контактные температуры и высокий температурный градиент могут вызвать в поверхностном слое детали температурные растягивающие напряжения и структурные превращения. В связи с этим при назначении скорости обработки необходимо сделать проверочный температурный расчет.

Наибольшие значения температуры на площади контакта инструмента с деталью могут быть определены по формуле [84]

$$\theta_{max} = \frac{4P_z a_1 \tau_m}{IR\,\Delta\lambda_1 \left[\dfrac{4\sqrt{2a_1\lambda}}{v\,\Delta\lambda_1}\tau_0 + 1\right]}, \tag{6.2}$$

где P_z — окружная сила при выглаживании, кгс; a_1 — коэффициент температуропроводности материала детали, см²/с; τ_m — максимальное значение безразмерной функции на площади контакта; $I = 42{,}7$ кгс·см/кал — термический эквивалент работы; R — радиус площади контакта, см; Δ — глубина пластически деформированного слоя металла при выглаживании, см; λ, λ_1 — коэффициенты теплопроводности соответственно материалов инструмента и детали, кал/см·с·°С; v — скорость выглаживания, см/с; τ_0 — безразмерная функция, характеризующая температуру в центре площади контакта.

Размер площади контакта может быть с достаточной точностью определен по формуле

$$R = \sqrt[3]{\frac{3P_y r}{4}\left[\frac{1-\nu_1^2}{E_1} - \frac{1-\nu_2^2}{E_2}\right]}, \tag{6.3}$$

где ν_1, ν_2 — соответственно коэффициенты Пуассона материала инструмента и детали; E_1, E_2 — соответственно модули упругости материала инструмента и детали.

В практике отделочно-упрочняющей и калибрующей обработки имеет место силовое контактное взаимодействие инструмента и детали, которое в общем случае ограничено поверхностями произвольной формы и кривизны, поэтому контур отпечатка, как правило, имеет форму эллипса.

При расчете деформаций и напряжений, а также температур, вызванных взаимодействием тел произвольной кривизны, целесообразно эллиптическую форму контакта условно представить равновеликим кругом с радиусом $R = \sqrt{lb}$, где l и b — полуоси эллиптического пятна контакта инструмента с деталью. В этом случае в формуле (6.3) радиус r должен быть заменен на приведенный радиус r_0. Последний может быть определен как параметр инструмента, при котором интенсивность давления σ_0 в центре площадки контакта тел произвольной кривизны равна интенсивности давления σ_0' в центре площадки контакта шара с плоскостью, если в обоих случаях сочетание материалов контактирующих тел и радиальная сила одинаковы. Интенсивность давления σ_0 при упругом контакте двух тел, ограниченных поверхностями произвольной кривизны, может быть рассчитана по формуле

$$\sigma_0 = \frac{n}{\pi}\sqrt[3]{\frac{3}{2}P\left(\frac{k}{\eta}\right)^2}, \qquad (6.4)$$

где $k = k_{11} + k_{12} + k_{21} + k_{22}$ — сумма главных кривизн контактируемых тел; n — коэффициент, зависящий от соотношения главных кривизн;

$$\eta = \frac{1-\nu_1^2}{E_1} + \frac{1-\nu_2^2}{E_2}.$$

Интенсивность давления σ_0' при упругом контакте шара с плоскостью определяют по формуле Герца. Если упругие свойства обоих тел одинаковы ($E_1 = E_2$ и $\nu_1 = \nu_2 = 0{,}3$), то формула (6.4) принимает вид

$$\sigma_0 = \alpha\sqrt[3]{4P_y E^2 A^2}; \quad \sigma_0' = 0{,}338\sqrt[3]{\frac{P_y E^2}{r_0^2}}. \qquad (6.5)$$

Приравнивая правые части формул (6.5), можно найти, что

$$r_0 = \frac{1}{2A}\sqrt{\left(\frac{0{,}338}{\alpha}\right)^3},$$

где $\alpha = \alpha\,(A/B)$ (см. рис. 6.13); A и B — коэффициенты, зависящие от главных кривизн контактирующих тел (табл. 6.9).

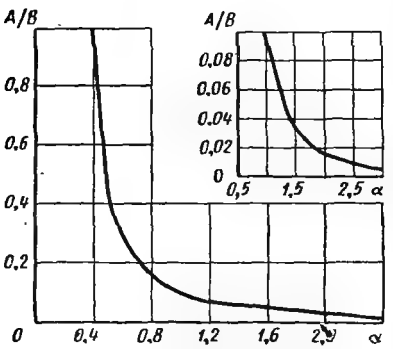


Рис. 6.13. Графики для определения параметра α при расчете приведенного радиуса r_0

Выражение для r_0 (рис. 6.13) получено с использованием зависимостей, имеющих место при упругом контакте. Как показали опытные данные, с учетом различных условий упругопластического контакта роль кривизны контактирующих тел в формировании контактных напряжений практически одинакова как при упругом, так и при упругопластическом силовом взаимодействии двух тел.

Значение Δ в формуле (6.2) может быть определено аналитически при исходной шероховатости не более $Ra \leq 0{,}63$ мкм из выражения [16]

$$\frac{\pi R^2 \sigma_s}{2P_y} = 1 - 2\frac{\Delta^2}{R^2} + \frac{2\frac{\Delta^3}{R^3}}{\sqrt{\frac{\Delta^2}{R^2}+1}}. \qquad (6.6)$$

Таблица 6.9

Коэффициенты *A* и *B* для различных соприкасающихся поверхностей

Соприкасающиеся поверхности	*A и B или B и A (A<B)*
	$\frac{1}{2r}$, $\frac{1}{2R_1}$
	$\frac{1}{2r}$, $\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$
	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$, $\frac{1}{2r}$
	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{R_3}\right)$; $\frac{1}{2R_1}$
	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{R_3}\right)$; $\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1}+\frac{1}{R_2}\right)$
	$\frac{1}{2}\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{R_3}\right)$; $\frac{1}{2}\left(\frac{1}{R_1}-\frac{1}{R_2}\right)$

Графически эта зависимость представлена на рис. 6.14. При обработке более чистых поверхностей значение Δ определяют по формуле

$$\Delta = \sqrt{\frac{3P_y}{2\pi\sigma_s} - R^2}. \qquad (6.7)$$

Скорость отделочно-упрочняющей обработки при прочих равных условиях процесса практически не оказывает влияния на глубину пластически деформируемого слоя металла, поэтому величина Δ может быть определена экспериментально путем измерения глубины наклепа после выглаживания образца с заниженной окружной скоростью.

Зависимость безразмерных функций τ_0 и τ_m от критерия Пекле $\mathrm{Pe} = \frac{vR}{2a_1}$ приведена на рис. 6.15.

Смазочно-охлаждающие жидкости. При выглаживании сталей в качестве СОЖ используют масло индустриальное 20, а при обработке цветных металлов и сплавов — керосин.

Режимы отделочно-упрочняющей обработки наиболее распространенных материалов, полученные на основании обобщения опыта внедрения выглаживания алмазным инструментом, приведены в табл. 6.10.

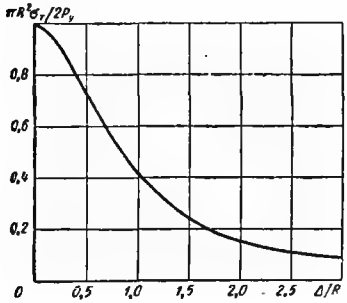


Рис. 6.14. График для расчета глубины наклепа Δ в зависимости от предела текучести материала изделия $\sigma_т$, радиальной силы P_y и размера площадки контакта R

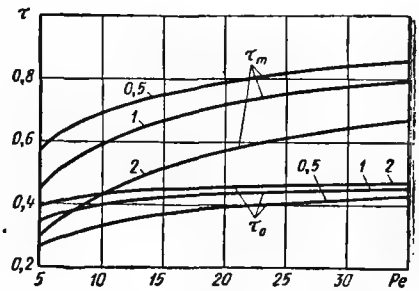


Рис. 6.15. Зависимость безразмерных функций, характеризующих температуру в центре площадки контакта τ, и максимальных их значений τ_m от критерия Пекле Pe

Таблица 6.10

Режимы отделочно-упрочняющей обработки

Материал	Твердость материала	Ra, мкм		Режим обработки			
		до выглаживания	после выглаживания	P_y, кгс	s, мм/об	v, м/мин	Ra, мм
15Х	HRC 58—64	0,32	0,08	16—18	0,05	90	1,2
20 (цементованная)	Незакаленная	2,5	0,32	10—15	0,05	80—150	2—5
	HRC 50	0,63—1,25	0,16—0,32	15	0,07	140	3
40Х	HRC 35 HRC 48 HRC 58	1,25 1,25 0,63	0,32 0,32 0,32	10 10 10	0,05 0,05 0,05	100 100 100	1,0 1,0 1,0
30	HB 170	2,5	0,16—0,32	12—15	0,05	30—90	1,2—20

Материал	Твердость материала	Ra_i, мкм		Режим работы			
		до выглаживания	после выглаживания	P_g, кгс	s, мм/об	v, м/мин	Ra, мкм
45	*HB* 190	1,25	0,08	14	0,02	25—185	3,4
	HRC 35	1,25	0,16	10—15	0,05	80—150	2,5
	HRC 40	2,5	0,08	20	0,05	80—150	2
	HRC 45	0,32	0,08	43	0,01	25—185	3,4
	HRC 61	1,25	0,16	14	0,02	25—185	1,2
40Х13	—	1,25	0,08	14	0,08	25—185	3,4
ШХ15	*HRC* 60—62	1,25	0,32	15	0,04	100—120	1,2
Р18	*HRC* 60—64	0,63	0,16	14	0,04	100—120	1,2
12Х18Н9Т	*HB* 200	1,25	0,32	13	0,02	100—120	1,2
1Х18Н2АТ	*HB* 230	1,25	0,16	18—23	0,05	30—90	1,2—2,0
12ХН3А	*HRC* 61	0,63	0,16	15	0,04	100—120	1,5
18ХГТ	*HRC* 62	0,63	0,16	15	0,04	100—120	1,5
38ХМЮА	*HB* 210	1,25	0,16	12—15	0,05	30—90	1,2—2,0
	HRC 65—66	0,16	0,04	20	0,02	94	2,0
30ХГСА	*HRC* 30—35	0,63	0,16	6	0,06	72	2,0
50ХФА	*HRC* 37—44	0,63	0,04	7	0,05	38	1,2
ХН38ВТ	*HB* 350	1,25	0,32	18	0,03	100—120	1,2
13Х11Н2ВМФ	*HB* 280	1,25	0,16	12—15	0,05	30—90	1,2—2,0
СЧ 21-40	—	1,25	0,32	15	0,07	100	1,5—2,5
Инвар Н32	—	0,63	0,08	15	0,07	40	2,5
АК6	—	0,63	0,08	8	0,05	50	3,0
Д1Т	—	0,63	0,04	8	0,03	100	3,0
В95-Т1	*HB* 182	0,63	0,04	12	0,05	25—185	3,4
ЛС59-1	*HB* 168	2,5	0,32	10	0,05	—	3,5
Бр.АЖ9-4	*HB* 238	2,5	0,32	11	0,05	—	3,5

Глава 7

КРАТКИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ОБОРУДОВАНИИ И НАЛАДКЕ ПРИ АБРАЗИВНОЙ И АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКЕ

§ 7.1. Оборудование для абразивной и алмазной обработки

Оборудование для абразивно-алмазной обработки можно разделить на три ıда: станки для обработки абразивными инструментами, станки для обработки ıмазными лезвийными инструментами, станки для отделочно-упрочняющей ıработки без снятия стружки.

Многие модели станков, предназначенных для обработки деталей инструıентами из обычных абразивных материалов, могут быть использованы и для ıботы алмазными инструментами. К станкам, применяемым для алмазной обраıтки, предъявляется ряд особых требований по точности, жесткости и плавности ıремещений узлов. Амплитуда колебаний шпиндельной бабки при холостом ıде станка не должна превышать 0,001—0,0015 мм, поэтому все быстровращаıщиеся детали привода и шпиндель должны быть отбалансированы динамически.

Радиальное биение шпинделя шлифовальной бабки не должно превышать 0025—0,004 мм для небольших станков и 0,003—0,005 мм для средних станков. еханизмы подач должны обладать высокой чувствительностью и допускать маıе перемещения на глубину шлифования (0,001—0,005 мм).

В заточных станках, работающих торцом круга, осевое биение шпинделя ı должно быть более 0,003—0,007 мм (в зависимости от размера станка). Жестıсть станков, работающих алмазными кругами, не должна быть менее 800 кгс/мм². гим требованиям отвечают станки высокой, особо высокой и частично повышенıй точности.

Лезвийный алмазный инструмент, а также инструмент из кубонита, эльбора т. п. используют для отделочной обработки на станках токарного и расточного ıпов. К этим станкам предъявляются повышенные требования по точности, жестıсти и уровню колебаний при холостом ходе. Соблюдение этих требований дает ıзможность достичь необходимой точности и шероховатости при хорошей стойıсти инструмента. Алмазным инструментом можно производить обработку на ıкарно-винторезных станках высокой и особо высокой точности, а также на ıделочно (алмазно)-расточных станках.

Отделочно-упрочняющую обработку алмазным инструментом без снятия ıружки производят преимущественно с использованием различных специальных ıриспособлений на обычных универсальных станках: токарных, расточных, ıрезерных и т. п.

Основные особенности и технические характеристики станков для абразивноıлмазной обработки приведены в работах [23, 44, 51, 57, 88, 97, 98].

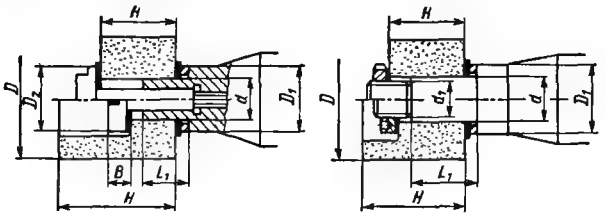
В табл. 7.1—7.3 показаны некоторые типовые наладки и приспособления ıис. 7.1—7.11) для установки и закрепления кругов и деталей при шлифоваıии [54].

Для закрепления деталей на плоскошлифовальных станках применяют маıнитные плиты, снабженные электрическими или постоянными магнитами. На них огут быть закреплены только детали из материалов, подвергающихся намагниıванию.

Для питания электромагнитов используют постоянный ток; при аварийном ıключении тока возможно вырывание детали. При шлифовании особо точных ıталей следует иметь в виду, что в процессе работы плита нагревается, а это ıриводит к изменению размеров обрабатываемых деталей.

Таблица 7.1

Крепление кругов на шпинделе или оправке винтом (гайкой)

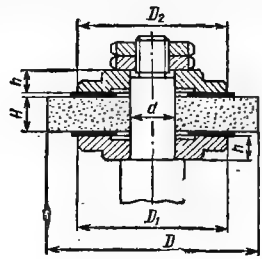


d	d_1	D_1, не менее	D_2, не менее	L_1	B *, не более	Размеры абразивного инструмента	
						D	H
10	—	16	14	10	6	⩽32	⩽20; 32 *
			16	25			⩽40
13	M10	20	18			40	⩽25; 50 *
		25	25			50	
16	M12	25	25	10	8	40	⩽20
				25			⩽50
				10		50	⩽20
				25			⩽40
				40			⩽63
20	M16	30	30	10		63	⩽20; 40 *
				25			⩽40; 50 *
				40			⩽63
		35	35	10		80	⩽20; 40 *
				25			⩽40; 50 *
				40			⩽63; 80 *
		45	45	10		100	⩽20; 50 *
				25			⩽40; 80 *

Примечания: 1. Размеры даны в мм.
2. Размеры, отмеченные звездочкой, относятся только к креплению инструмента чашечной формы, с выточкой.

Таблица 7.2

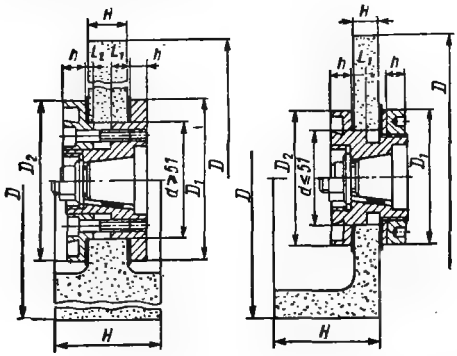
Крепление кругов на шпинделе или оправке фланцами



d	$D_1 = D_2$, не менее	h, не менее	Размеры абразивного инструмента	
			D	H
10	16	3	⩽32	⩽40
13	20		40	
16	25		40; 50	⩽50
20	30	5	63	⩽63
	35		80	
	40		100	
32	60	6	125; 150	⩽50
	80	8	175; 200	
	100	10	250	
			300	⩽5
	150	13	400	
	175	16	500	

Примечание. Размеры даны в мм.

Крепление кругов на переходных фланцах



d	$D_1 = D_2$	b_1	L_1	h, не менее	Размеры абразивного инструмента	
					D	H, не более
32	80	12	—	6	175; 200	32; 80 *
	100	12	—	6	250	25
51	75	12	—	8	125—175	50; 80 *
					200—300	
76	115	12	4	11	200—300	50
		25				100
127	165	12	6	11	250; 300	50
		25				100
						200; 250 *
	175	12			350	50
		25				100
						200; 275 *
	185	12			400	80
					450	63
203	260	12	6	16	350—400	50
		25				200
305	365	12			500	50
		25				200

Примечания: 1. Размеры даны в мм.
2. Размеры, отмеченные звездочкой, относятся только к креплению инструмента чашечной формы, с выточкой.

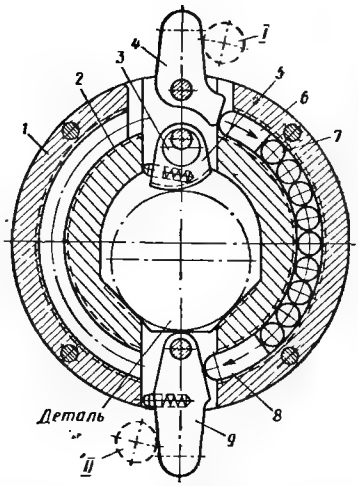


Рис. 7.1. Двухплечий поводок для работ повышенной точности:

1 — крышка; *2* — корпус; *3* — кривошип; *4*, *9* — рычаг; *5* — эксцентрик; *6*, *8* — нажимные сухари; *7* — шарики; *I*, *II* — поводковые пальцы

В последнее время применяют комбинированные плиты с импульсным магнитом. Такая плита снабжена постоянными магнитами, а электромагнит работает в импульсном режиме, увеличивая силу притяжения, но не нагревая плиту.

Расчет электромагнитных плит производят в следующем порядке. Сила, удерживающая деталь на плите,

$$F = \frac{P_z}{f},$$

где P_z — окружная сила при шлифовании, кгс; $f = 0{,}1 \div 0{,}15$ — коэффициент трения.

Сила, приходящаяся на одну пару полюсов,

$$F' = \frac{F}{2n},$$

где n — число полюсов электромагнита.

Площадь поперечного сечения сердечника

$$S = \frac{25F' \cdot 10^6}{B^2};$$

здесь B — магнитная индукция материала сердечника, Гс (по табл. 7.4).

Общее сопротивление магнитопровода

$$R = \sum_{i=1}^{n} \frac{l_i}{\mu_i S_i},$$

где $l_1 \cdots l_i \cdots l_n$ — длины участков магнитопровода, см; $\mu_1 \ldots \mu_i \ldots \mu_n$ — магнитная проницаемость участков (табл. 7.4); $S_1 \ldots S_i \ldots S_n$ — поперечное сечение каждого участка, см^2.

Общий магнитный поток (с учетом 30% потерь)

$$\Phi = 0{,}7BS.$$

Таблица 7.4

Значения магнитной индукции и магнитной проницаемости (для воздуха μ = 1)

Напряженность магнитного поля, Э	Магнитная индукция *B*, Гс			Магнитная проницаемость μ	
	Чугун СЧ 12-28	Сталь 10	Воздух	Чугун СЧ 12-28	Сталь 10
20	5 900	14 400	20	300	740
30	6 400	15 200	30	225	530
40	6 850	15 700	40	185	435
50	7 250	16 000	50	155	350
100	8 500	17 000	100	145	245
150	9 500	17 700	150	70	140
200	10 250	18 200	200	50	90
250	10 800	18 500	250	43	75

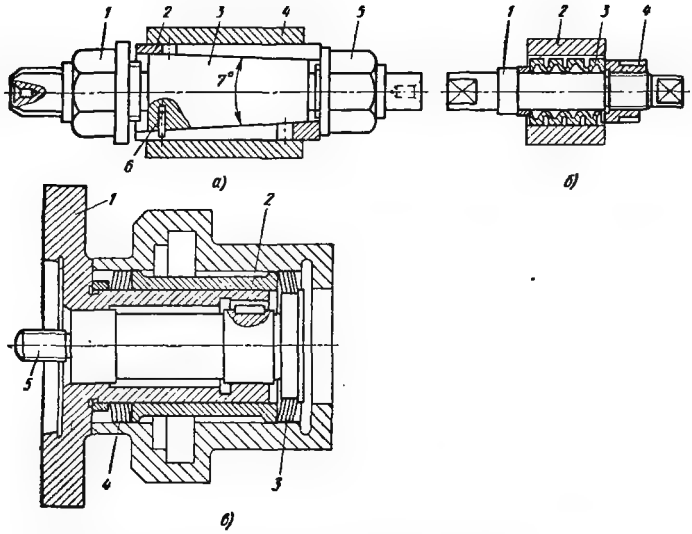


Рис. 7.2. Разжимные оправки к круглошлифовальным станкам:

а — цанговая; *1*, *5* — гайка; *2* — цанга; *3* — конус; *4* — деталь; *б* — штифт; *б* — с гофрированными элементами; *1* — оправка; *2* — деталь; *3* — втулка; *4* — гайка; *в* — с пакетом тарельчатых пружин; *1* — корпус; *2* — распорная втулка; *3*, *4* — пакеты тарельчатых пружин; *5* — нажимной стержень

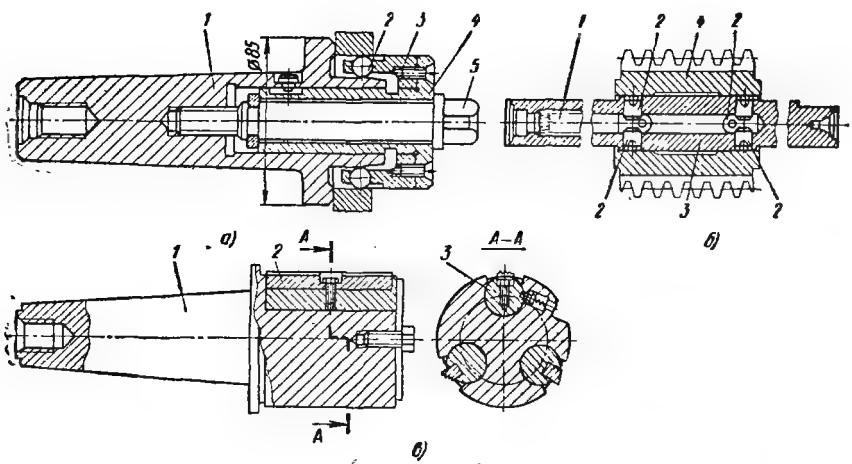


Рис. 7.3. Раздвижные оправки:

а — шариковая; *1* — корпус; *2* — шарик; *3* — сепаратор; *4* — втулка; *5* — винт зажимной; *б* — плунжерная; *1* — винт; *2* — радиальные плунжеры; *3* — корпус; *4* — деталь; *в* — самозажимная; *1* — корпус; *2* — сухари; *3* — опоры

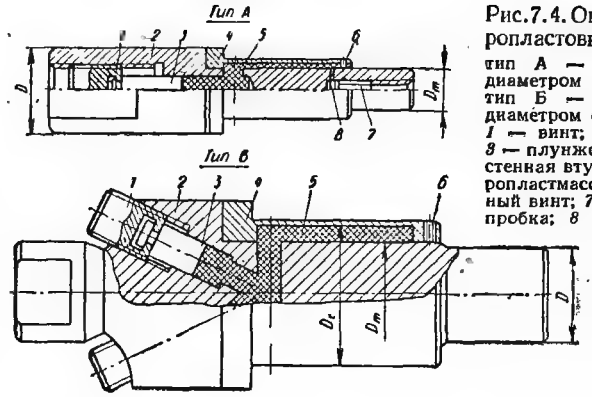


Рис. 7.4. Оправки с гидропластовым зажимом:

тип А — для деталей диаметром 20—40 мм; тип Б — для деталей диаметром свыше 40 мм; *1* — винт; *2* — корпус; *3* — плунжер; *4* — тонкостенная втулка; *5* — гидропластмасса; *6* — стопорный винт; *7* — резьбовая пробка; *8* — прокладка

Рис. 7.5. Инерционный шариковый патрон:

1 — корпус; *2* — втулка; *3* — шарик; *4* — маховик; *5* — цанга

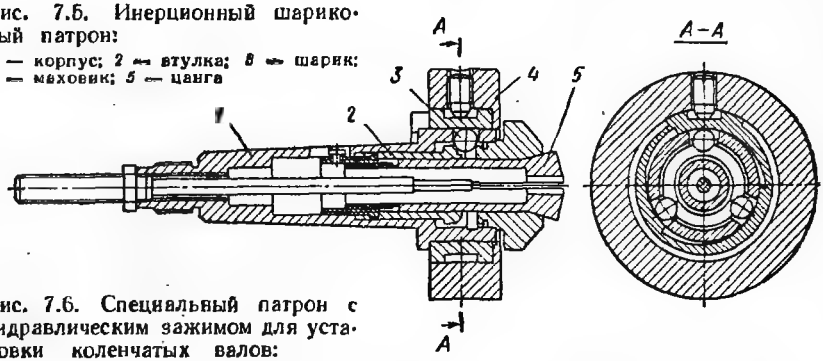


Рис. 7.6. Специальный патрон с гидравлическим зажимом для установки коленчатых валов:

1 — заливка для балансировки; *2* — поршень; *3*, *13* — пружина; *4* — тяга; *5* — вкладыш; *6* — рычаг; *7* — ось; *8* — сухарь; *9*, *10* — упор; *11* — собачка; *12* — плунжер; *14* — делительный диск

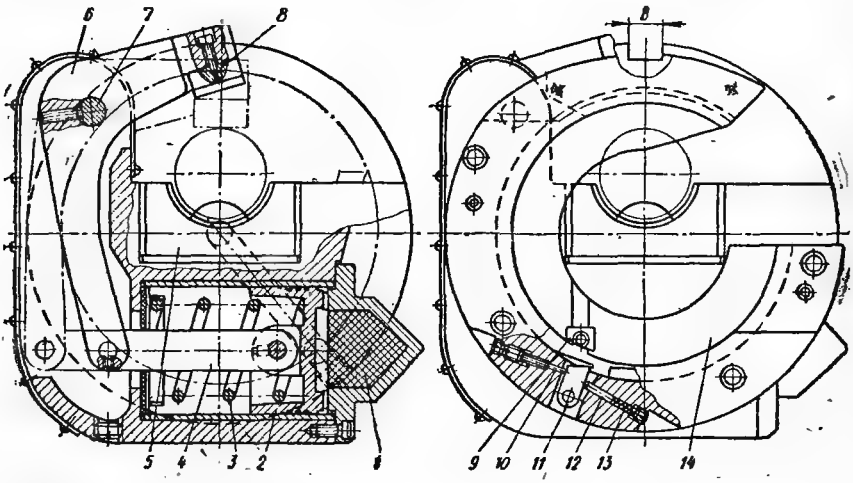


Рис. 7.7. Патрон для установки цилиндрических зубчатых колес на внутришлифовальном станке:

1 — планшайба; 2 — ролик; 3 — шток с обоймой; 4 — упор; 5 — кулачки; 6 — палец; 7 — ось; 8 — ограничитель угла поворота; 9 — пружина; 10 — рычаг

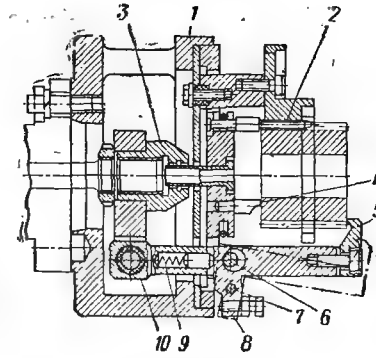
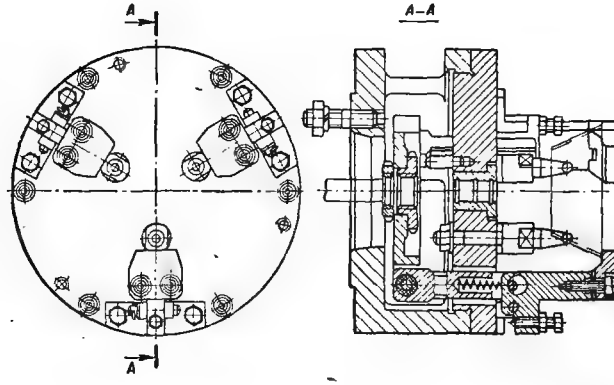


Рис. 7.8. Патрон для установки конических зубчатых колес на внутришлифовальном станке



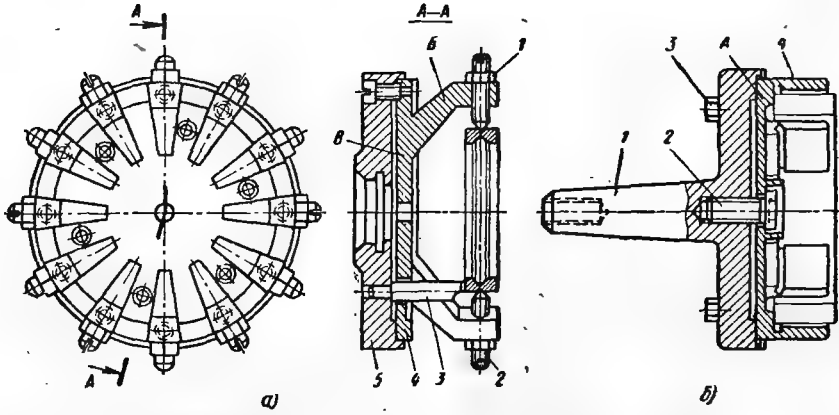


Рис. 7.9. Мембранные патроны к внутришлифовальным станкам:

а — винтовой: 1 — контргайка; 2 — винт; 3 — упор; 4 — мембрана с кулачками (кулачки Б перемещаются при деформации мембраны В); б — планшайба; 6 — кулачковый; 1 — оправка; 2 — нажимной винт; 3 — крепежный винт; 4 — мембрана; А — упор

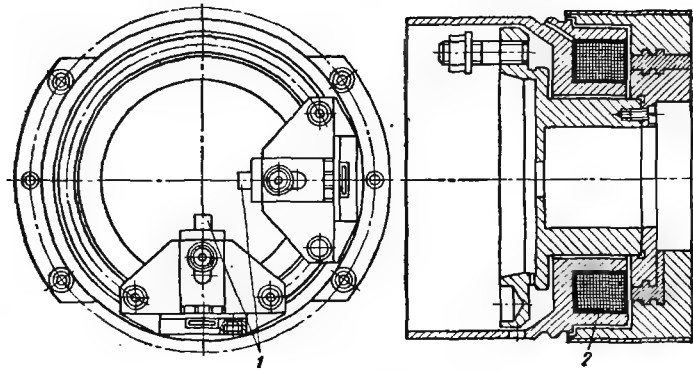


Рис. 7.10. Магнитный патрон для бесцентровой установки детали на внутришлифовальном станке:

1 — жесткие опоры; 2 — обмотка электромагнита (опоры 1 в разрезе не показаны)

Количество ампер-витков катушки

$$I\omega = \frac{\Phi R}{0{,}4\pi},$$

где I — сила тока, А; ω — количество витков катушки.

Диаметр провода катушки

$$d = \sqrt{\frac{4I}{\pi q}},$$

где $q = 3 \div 5$ — допускаемая плотность тока, А/мм².

Устройства с постоянными магнитами снабжены верхней и нижней плитами из стали 10 (отожженной), стальные пластины верхнего блока и вставки верхней плиты изготовляют из электротехнической стали, прокладки блока из меди или латуни, диамагнитные заливки вставок из баббита или красной меди. Материал постоянных магнитов — сплавы ЮНДК15, ЮНДК18, ЮНДК24.

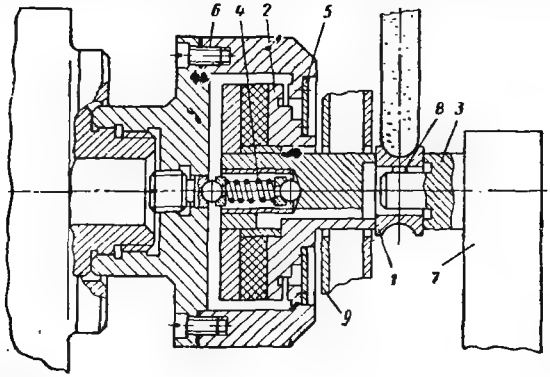


Рис. 7.11. Устройство для базирования детали с узкими торцами:

1 — обрабатываемая деталь; 2 — патрон; 3 — осевые опоры; 4 — пружина; 5 — мембрана; 6 — корпус; 7 — кронштейн; 8 — радиальные опоры; 9 — лоток выгрузки

Сила, удерживающая деталь на плите с постоянными магнитами,

$$F = \frac{P_z}{f}.$$

Удельная удерживающая сила $F' \approx 15$ кгс/см^2.

Высота постоянных магнитов равна 48—52 мм; толщина стальных пластин блока $b = 10 \div 12$ мм; толщина постоянного магнита $B = (2 \div 2{,}2)\ b$ мм. Зазор между магнитным блоком и верхней плитой не более 0,03 мм

§ 7.2. Техника безопасности

При работе на станках с абразивным инструментом должны быть предусмотрены следующие мероприятия [35]: 1) защита глаз рабочего от мелких осколков и металлической пыли, образующихся при шлифовании, а также в случае разрыва круга; 2) удаление абразивно-металлической пыли из зоны обработки; 3) защита рабочего от аэрозолей, образующихся при работе с СОЖ и электролитами 4) обеспечение надежного ограждения шлифовального круга; 5) снижение уровня вредных вибраций и шума.

Подготовка к работе и эксплуатация абразивного инструмента

Правильный выбор характеристики абразивного инструмента для той или иной технологической операции играет существенную роль в обеспечении безопасной работы. Основным условием выбора является соблюдением норм допустимой окружной скорости (ГОСТ 4785—64). Следует иметь в виду, что прочность кругов прямого профиля больше, чем прочность фасонных кругов, на которых в местах переходов от одной поверхности к другой могут быть сконцентрированы напряжения. Поэтому переходы должны быть выполнены с максимально возможным радиусом.

Рабочие окружные скорости абразивного шлифовального инструмента при механических подачах и обработке твердосплавного инструмента регламентированы ГОСТ 16182—70. Дисбаланс шлифовального круга не должен превышать допустимых величин (см. гл. 2, § 2.2).

Абразивный инструмент очень чувствителен к внешним воздействиям: толчкам, ударам, повышенной влажности, низкой температуре. Вызванные этими воздействиями незаметные при внешнем осмотре внутренние трещины могут стать причиной разрыва круга.

Абразивный инструмент перед транспортировкой должен быть тщательно упакован в специальные пакеты, коробки, ящики и контейнеры, переложен сухим упаковочным материалом (опилками, бумагой, картоном), не допускающим взаимного перемещения инструмента. Все шлифовальные круги, полученные предприятием, должны быть осмотрены в присутствии работников ОТК и проверены на отсутствие трещин. Проверку кругов производят простукиванием абразивного инструмента в подвешенном состоянии деревянным молотком массой 200—300 г. Инструмент без трещин издает чистый звук. Применять круги с дребезжащим звуком запрещается.

Круги необходимо хранить в специальных закрытых складах при температуре не ниже 5° С и влажности не выше 65% (ГОСТ 4785—64), на стеллажах высотой не более 3 м, а при отсутствии механизации на складе — на стеллажах не более 2 м (для инструмента массой больше 16 кг высота стеллажа должна быть не более 1,6 м). Ячейки металлических стеллажей должны быть обшиты деревом или прочным мягким материалом.

Круги формы Д следует хранить в стопках между металлическими дисками толщиной не менее 2 мм и диаметром, равным диаметру круга. Круги формы Д должны находиться под постоянной нагрузкой около 3 кгс во избежание коробления. Круги на бакелитовой связке в случае их хранения свыше одного года можно применять в производстве только после повторных испытаний на твердость и прочность.

Таблица 7.5

Испытания кругов на прочность

Скорость, м/с		Наружный диаметр инструмента, мм	Вид инструмента
испытания, $v_и$	рабочая окружная v,		
1,3 v	≤100	≥200	Круги типа Д
	≤20		Гибкие полировальные круги на вулканитовой связке
1,5 v	≤40	≥150	Прочие, кроме кругов ПН, ПР, К и М
	Св. 40 до 100	≥30	

Перед выдачей кругов в цеха должно быть произведено их испытание вращением на прочность. В соответствии с ГОСТ 12.2.001—74 на прочность испытывают все круги диаметром 150 мм и более, а также круги диаметром 30 мм и более, предназначенные для работы со скоростью свыше 40 до 100 м/с. На механическую прочность не испытывают круги типа ПН, ПР, К и М.

Круги испытывают на прочность при вращении со скоростью, превышающей рабочую (табл. 7.5).

Продолжительность испытания для кругов с наружным диаметром до 150 мм 3 мин, для кругов с наружным диаметром более 150 мм 5 мин.

Алмазные круги на металлической связке диаметром 125 мм и более и алмазные круги на органической и керамической связках диаметром 100 мм и более должны быть испытаны на механическую прочность соединения алмазоносного слоя с корпусом. Испытание производят вращением круга со скоростью, на 50% превышающей рабочую скорость, продолжительность испытания равна 5 мин. Результаты испытания записывают в паспорт круга.

Круги на прочность испытывают вращением на специальных станках, технические данные которых указаны в табл. 7.6.

Круг должен иметь отметку об испытании. Шлифовальные круги на станок должен устанавливать рабочий, знающий правила обращения с кругами, или наладчик. При подключении станка необходимо следить за тем, чтобы направление резьбы гайки, закрепляющей круг, было обратным направлению вращения круга. Если предусматривается вращение круга в обе стороны, то должны быть приняты меры по предупреждению самоотвинчивания гайки.

Таблица 7.6

Станки для испытания кругов

Параметры станка	Модель станка			
	СИП-200	СИП-400	СИП-800	СИП-1200
Диаметры испытуемых кругов, мм	125—200	250—400	150—750	900—1200
Достижимые окружные скорости круга, м/с	37,5—82,5	36,5—82,5	41—82,5	37,5—66

После установки круга на станок его следует вращать вхолостую при наибольшей рабочей скорости: при диаметре до 400 мм не менее 2 мин, при диаметре свыше 400 мм 5 мин. Защитный кожух станка при вращении круга должен быть закрыт.

Смазочно-охлаждающая жидкость, применяемая при обработке, должна быть безвредна для здоровья рабочего и не должна снижать механическую прочность круга. Если во время работы круг погружен в СОЖ, то после работы его необходимо просушить.

Наименьший допускаемый диаметр сработанных кругов, закрепленных на шпильке или винтом (за исключением кругов диаметром менее 6 мм), должен быть на 2 мм больше диаметра шпильки или головки винта. При креплении круга на шпинделе предельный диаметр сработанного круга должен быть больше диаметра головки винта или фланца на 10 мм, а при закреплении на переходных фланцах — на 20 мм.

Боковыми поверхностями кругов разрешается шлифование, если только они специально предназначены для такого вида работ.

Алмазные шлифовальные круги необходимо транспортировать и хранить при температуре 5—20° С и относительной влажности не более 70%.

Алмазные круги можно эксплуатировать при биении не свыше 0,01 мм. Правку круга лучше производить с охлаждением. При правке без охлаждения необходимо обеспечить отсос абразивной пыли. В связи с трудностями правки алмазные круги не рекомендуется часто снимать со станка; с оправки круг следует снимать лишь для замены. Круг нельзя класть на металлические предметы алмазоносной стороной и перекатывать.

Требования безопасности при работе на станках. Для обеспечения безопасной работы необходимо соблюдать правила эксплуатации станков и абразивного инструмента. Категорически запрещается работа на неисправном станке, использование станка не по назначению (например, не допускается затачивать инструмент вручную на круглошлифовальных станках), а также оставлять без присмотра работающие станки.

При работе вручную, когда деталь или шлифовальная головка находятся в руках рабочего, следует избегать резких толчков и ударов.

Обработку деталей, удерживаемых в руках (при толщине более 2 мм), необходимо производить с подручниками; при этом диаметр круга должен быть не более 400 мм. Подручник должен быть без выбоин и дефектов; его необходимо устанавливать так, чтобы точка соприкосновения детали с кругом находилась на оси круга или выше ее, но не более чем на 10 мм. Зазор между подручником и кругом не должен быть более 3 мм. Во избежание заклинивания детали между подручником и кругом следует правильно устанавливать подручник и следить за правильным положением детали в руках.

При работе на полировальных станках запрещается применять круги, состоящие из секций, выполненных из различных материалов. При обработке войлочных и прошитых матерчатых полировальных кругов необходимо иметь надежную вентиляцию и специальные приспособления.

При работе на плоскошлифовальных станках с магнитными плитами необходимо тщательно очищать последние. Станки с электромагнитными плитами должны иметь блокирующие устройства, отключающие станок при прекращении подачи электроэнергии в электромагнитную плиту. Более безопасными являются плиты с постоянными магнитами и надежной фиксацией рукоятки включения.

На круглошлифовальных станках должны быть предусмотрены устройства, предотвращающие отход пиноли задней бабки в процессе шлифования, ограждение патронов, в которых закрепляют деталь. Предпочтительно использование безопасных хомутиков, не имеющих выступающих частей. Необходимо тщательно проверить наладку станка и не допускать врезания круга в деталь, патрон или бабку станка.

Существенную роль в обеспечении безопасности при работе с абразивным инструментом играют средства индивидуальной защиты зрения, органов дыхания кожных покровов лица и рук. Для защиты глаз от металлических частиц, стружки, окалины и частиц абразива, имеющих большую скорость, применяют защитные очки. Использование таких средств защиты позволяет предупредить более 50%

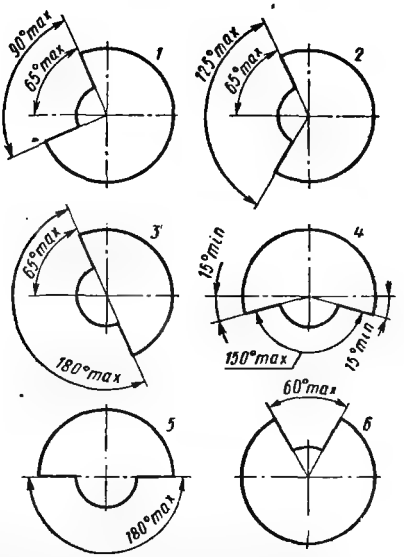


Рис. 7.12. Расположение и наибольшие допускаемые углы раскрытия защитных кожухов в различных условиях работы для кругов, применяемых:

1 — на обдирочных и точильных станках; *2* — на обдирочных и заточных станках при расположении обрабатываемой детали ниже оси круга; *3* — на круглошлифовальных и бесцентрово-шлифовальных и заточных станках; *4* — на плоскошлифовальных станках, работающих периферией; *5* — на переносных станках с гибким валом и на обдирочных станках с качающейся рамой (маятниковых); *6* — для кругов, работающих наиболее высокой своей точкой

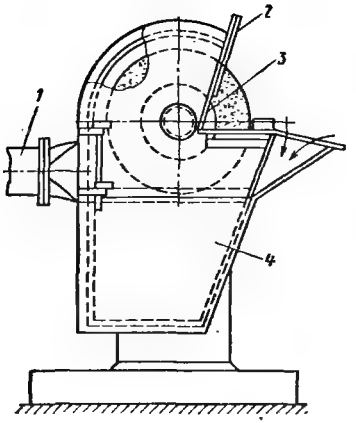


Рис. 7.13. Схема простого кожуха с пылеуловителем

всех травм глаз. Для индивидуальной защиты применяют также шлемы. Такие индивидуальные средства защиты, как респираторы, применяют в тех случаях, когда концентрация пыли превышает установленные нормы.

Для защиты рук от воздействия СОЖ иногда применяют гидрофобные пасты и мази.

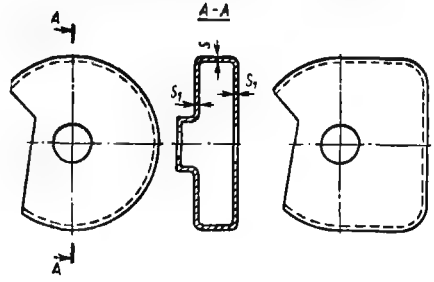
Защитные устройства станков. К защитным устройствам станков при абразивной обработке относятся блокирующие устройства, защитные кожухи, оградительные устройства, щитки, решетки, барьеры и т. п., которые должны надежно защищать рабочего от брызг охлаждающей жидкости, пыли и абразивных частиц, от осколков разорвавшегося круга.

Наиболее важными из защитных устройств являются защитные кожухи. Защитные кожухи выполняют в виде футляра с откидной или съемной боковой стенкой. Они должны быть надежно закреплены на станке и обладать необходимой прочностью. Кожухи изготовляют из литой стали (25Л-11 или 35Л-11) или сварными из листовой стали (Ст2, Ст3). Толщина стенки кожуха равна от 3 мм для малых кругов при обычном шлифовании и до 32 мм для кругов диаметром более 1 м при скоростном шлифовании (табл. 7.7—7.11).

Расположение и наибольшие допускаемые углы раскрытия защитных кожухов на станках с горизонтальным шпинделем в соответствии с ГОСТ 12.2.001—74 показаны на рис. 7.12. Для кожухов, не имеющих защитных козырьков, угол раскрытия над горизонтальной плоскостью, проходящей через ось шпинделя станка, не должен превышать 30°. Зазор между кругом и верхней кромкой раскрытия защитного кожуха, а также между кругом и предохранительным козырьком, установленными на кожухе, не должен быть более 6 мм. Зазор между торцом фланцев, крепящих круг наибольшей для данного станка высоты, и боковой стенкой кожуха должен быть в пределах 5—10 мм.

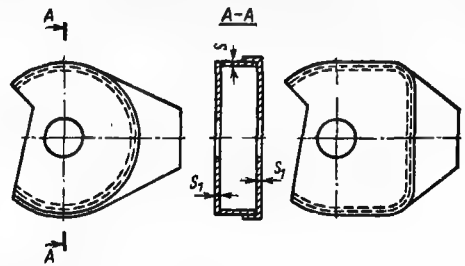
Таблица 7.7

Минимальная толщина стенок защитного кожуха для кругов с рабочей окружной скоростью до 40 м/с (размеры в мм)



Диаметр шлифовального круга	Наибольшая высота шлифовального круга	Толщина стенок кожуха: из литой стали марок 25Л-II и 35Л-II		из листовой стали марок Ст2, Ст3	
		S	S_1	S	S_1
До 150	50	—	—	3	2
	100				
Св. 150 до 300	50	6	6	4	2
	100	8	6	5	3
	150	10	8	6	4
	200	12	10	7	5
Св. 300 до 400	50	8	6	4	3
	100	10	8	5	3
	150	12	10	6	4
	200	14	11	8	5
Св. 400 до 500	50	10	8	6	4
	100	12	10	7	5
	150	14	12	8	6
	200	16	13	10	7
Св. 500 до 600	50	12	10	8	5
	100	14	12	9	6
	150	16	14	10	7
	200	18	16	12	8
Св. 600 до 750	50	16	14	9	6
	100	18	16	10	7
	150	20	18	12	8
	200	22	20	14	9
Св. 750 до 1100	50	18	16	12	9
	100	22	20	14	10
	150	25	22	16	12
	200	28	24	18	12
Св. 1100 до 1400	50	22	20	16	12
	100	24	22	18	14
	150	26	24	20	16
	200	30	26	22	18

Минимальная толщина стенок защитного кожуха для кругов с рабочей окружной скоростью свыше 40 до 63 м/с (размеры в мм) *Таблица 7.8*



Диаметр шлифовального круга	Наибольшая высота шлифовального круга	Толщина стенок кожуха: из литой стали марок 25Л-II, 35Л-II, S	из литой стали марок 25Л-II, 35Л-II, S_1	из листовой стали марок Ст2, Ст3, S	из листовой стали марок Ст2, Ст3, S_1
До 80	50 100	—	—	3	2
Св. 80 до 150	50 100 150 200	6 8 10 12	6 7 8 10	4 4 5 7	3 3 4 5
Св. 150 до 300	50 100 150 200	7 9 12 14	7 8 9 10	5 6 7 8	4 4 4 5
Св. 300 до 400	50 100 150 200	10 12 14 16	8 9 10 12	7 8 9 10	5 5 6 7
Св. 400 до 500	50 100 150 200	14 16 18 20	12 12 14 16	8 9 11 13	6 7 8 9
Св. 500 до 600	50 100 150 200	16 18 20 22	14 16 18 20	10 11 12 14	7 8 9 10
Св. 600 до 750	50 100 150 200	20 22 24 26	16 18 20 22	12 14 16 18	8 9 10 12
Св. 750 до 1100	50 100 150 200	24 28 30 32	20 22 25 28	14 18 20 22	10 12 12 14
Св. 1100 до 1400	50 100	28 32	22 25	16 20	12 16

Таблица 7.9

Минимальная толщина стенок защитного кожуха для кругов с рабочей окружной скоростью свыше 63 до 80 м/с (размеры в мм)

Диаметр шлифовального круга	Наибольшая высота шлифовального круга	Толщина стенок кожуха из листовой стали марок Ст2, Ст3 (ГОСТ 380—71)	
		S	S_0
До 80	50	3	3
	100	4	3
Св. 80 до 150	50	5	4
	100	6	5
Св. 150 до 300	50	6	5
	100	8	6
	150	10	7
	200	12	8
Св. 300 до 400	50	8	6
	100	10	8
	150	12	9
	200	14	10
Св. 400 до 500	50	10	8
	100	12	9
	150	14	10
	200	16	12

Диаметр шлифовального круга	Наибольшая высота шлифовального круга	Толщина стенок кожуха из листовой стали Ст2, Ст3 (ГОСТ 380—71)	
		S	S_1
Св. 500 до 600	50	12	8
	100	14	10
	150	16	12
	200	18	14
Св. 600 до 750	50	14	10
	100	16	12
	150	18	14
	200	20	14
Св. 750 до 1100	50	16	12
	100	18	12
	150	20	14
	200	22	16
Св. 1100 до 1400	50	18	12
	100	20	14

Таблица 7.10

Минимальная толщина стенок защитного кожуха для кругов с рабочей окружной скоростью свыше 80 до 100 м/с (размеры в мм)

Диаметр шлифовального круга	Наибольшая высота шлифовального круга	Толщина стенок кожуха из листовой стали марок Ст2, Ст3 (ГОСТ 380—71)		Диаметр шлифовального круга	Наибольшая высота шлифовального круга	Толщина стенок кожуха из листовой стали марок Ст2, Ст3 (ГОСТ 380—71)	
		S	S_1			S	S_1
До 80	50	4	3	Св. 500 до 600	50	14	10
	100	5	4		100	16	12
Св. 80 до 150	50	6	5		150	18	14
	100	8	6		200	20	16
Св. 150 до 300	50	8	6	Св. 600 до 750	50	16	12
	100	10	7		100	20	14
	150	12	9		150	22	16
	200	14	10		200	25	18
Св. 300 до 400	50	10	7	Св. 700 до 1100	50	20	16
	100	12	9		100	25	18
	150	14	10		150	28	20
	200	16	12				
Св. 400 до 500	50	12	9	Св. 1100 до 1400	50	25	18
	100	14	10		100	30	22
	150	16	12				
	200	18	14				

Таблица 7.11

Минимальная толщина защитного кожуха для отрезных кругов высотой до 10 мм

Рабочая окружная скорость круга, м/с	Диаметр круга, мм	Толщина стенок кожуха из листовой стали марок Ст2, Ст3, мм		Рабочая окружная скорость круга, м/с	Диаметр круга, мм	Толщина стенок кожуха из листовой стали марок Ст2, Ст3, мм	
		S	S_1			S	S_1
До 80	До 300	3	2	Св. 80 до 100	До 300	4	3
	Св. 300 до 500	4	3		Св. 300 до 500	5	4
	Св. 500 до 750	5	4		Св. 500 до 750	6	4
	Св. 750 до 1200	8	6		Св. 750 до 1200	10	7

На станках, работающих при скоростях свыше 40 м/с, защитный кожух должен иметь окраску, отличную от окраски станка (по ГОСТ 15548—70). Внутреннюю часть всех кожухов окрашивают в красный цвет. При окружной скорости круга свыше 60 м/с станок должен быть снабжен дополнительными защитными устройствами — экранами и ограждениями, закрывающими рабочую зону во время шлифования и открытый участок круга (при отводе).

Вентиляция, борьба с шумом и вибрацией. Процессы абразивной обработки сопровождаются интенсивным образованием различных веществ, вредных для здоровья и вызывающих ускорение износа оборудования. В связи с этим все станки для абразивной обработки должны быть оборудованы отсасывающими устройствами. Вредные вещества должны отсасываться непосредственно из зоны их образования, а отсасываемый воздух перед выбросом его в окружающую среду должен очищаться.

Применяют различные конструкции защитных кожухов с отсасывающими патрубками и без них, с пылеуловителями (рис. 7.13). Патрубок *1* соединяет кожух с отсасывающей сетью. Подвижный щиток *2* может перемещаться относительно неподвижного щитка *3*, что дает возможность поддерживать минимальный зазор между кожухом и кругом. Нижняя часть кожуха *4* является уловителем крупной пыли, падающей в него за счет запаса кинетической энергии.

Для очистки воздуха применяют центробежные, мокрые, тканевые и волокнистые пылеуловители, электрические фильтры. Очистку воздуха можно производить в индивидуальном или в центральном пылеуловителе, обслуживающем весь цех. Для очистки воздуха широко применяют циклоны СИОТ, циклоны с водяной пленкой ЦВП-ЛИОТ и др. Среди индивидуальных обеспыливающих агрегатов используют пылесос В19-101, вентиляторный пылеулавливающий агрегат МИОТ-59М, пылесборник Н-801-57, агрегат ЗИЛ-900.

К факторам, оказывающим вредное воздействие на человека, относятся также шум и вибрации, которые могут возникать при работе станков, связанных с абразивной обработкой. Оборудование необходимо периодически проверять на уровень шума и вибрации в соответствии с требованиями стандартов и норм станкостроения. Шум и вибрации можно устранить при уравновешивании вращающихся масс, изменении жесткостей и масс элементов конструкции, применении виброизолирующих устройств.

При работе с ручным оборудованием суммарное время контакта с вибрирующими поверхностями не должно превышать $^2/_3$ длительности рабочего дня. К работе с таким оборудованием допускаются лица не моложе 18 лет, прошедшие медицинский осмотр.

Электробезопасность и освещение. Электробезопасность обеспечивается при использовании безопасного напряжения (12 и 36 В), надлежащей изоляции и защите токоведущих частей, установке автоматического отключения частей электрооборудования, случайно оказавшихся под током, заземлении корпусов оборудования, предупредительной сигнализации, надписей, плакатов, защитных средств.

Для освещения рабочих мест наиболее целесообразно комбинировать общее освещение в цехе с местным. Лампы должны иметь отражатели с защитным углом не менее 30° (при расположении светильника на уровне глаз рабочего — не менее 10°) из непросвечивающего материала. При работе на шлифовальных и полировальных станках, где необходим визуальный контроль блестящих металлических поверхностей, светильники местного освещения должны быть перекрыты снизу светорассеивающим стеклом. Предел освещенности рабочего места — до 10 000 лк.

Глава 8

МЕТОДИКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ АБРАЗИВНОЙ И АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКЕ

§ 8.1. Расчет себестоимости обработки абразивным и алмазным инструментом

Критерием сравнительного экономического эффекта различных технологических процессов в целом и их отдельных операций служит технологическая себестоимость обработки, которая включает не все статьи затрат, связанные с процессом обработки, а только затраты, величина которых меняется с изменением процесса обработки. При внедрении синтетических алмазов или других сверхтвердых материалов варианты технологических процессов (операций) могут отличаться один от другого видом обработки (абразивная или алмазная), применяемым оборудованием (универсальное или специальное), режимом обработки, применяемой технологической оснасткой, инструментом (круги различных марок), организационно-техническими условиями производства (работа с наладчиком или без него), различной производительностью процессов, размерами занимаемых производственных площадей и т. д.

Расчет технологической себестоимости операций при сравнении различных вариантов изготовления детали может быть выполнен двумя способами: 1) методом, который основывается на определении величины расходов по каждому элементу затрат, различающемуся в сопоставляемых вариантах; 2) приближенным — на основании нормативов затрат, приходящихся на 1 ч работы оборудования.

Первый метод используют, когда требуется точный и по возможности конкретный анализ величин отдельных затрат, составляющих технологическую себестоимость операции. При этом по каждому элементу затрат расходы определяют прямым счетом, что сложно и трудоемко. Точнее и быстрее искомые результаты получают с помощью коэффициентов затрат: машино-коэффициентов $K_м$, коэффициентов часовых затрат $K_{ч.з}$ и коэффициентов часовых приведенных затрат $K_{п.з}$. Применение метода коэффициентов затрат значительно упрощает все расчеты по определению технологической себестоимости и при этом позволяет использовать в расчетах заводские фактические данные о величине расходов, связанных с эксплуатацией оборудования.

Формула технологической себестоимости операции при применении метода коэффициенто-машино-часа имеет вид

$$C_т = \left(T_ш C_з + C_{м.ч}^{баз} T_м K_м\right) П + n T_{п.з} C_{з.н} + A C_{об}, \qquad (8.1)$$

где $T_ш$ — норма штучного времени на операцию, ч; $C_з$ — часовая (основная и дополнительная с начислениями) заработная плата рабочего, коп.; $C_{м.ч}^{баз}$ — стоимость 1 ч работы базового станка (определяют по фактическим данным предприятия или выбирают по табл. 8.4); $T_м$ — норма машинного времени, ч; $K_м$ — машино-коэффициент, показывающий, во сколько раз затраты, связанные с работой данного станка, больше, чем аналогичные расходы у базового станка (определяют по заводским данным или по табл. 8.4); $П$ — годовая производственная программа выпуска изделий, шт.; n — число переналадок станка или число обрабатываемых за год партий; шт.; $T_{п.з}$ — норма подготовительно-заключительного времени, ч; $C_{з.н}$ — часовая (основная и дополнительная с начислениями) заработная плата наладчика, коп.; A — коэффициент амортизации и эксплуатации специальной оснастки; его величина зависит от срока службы оснастки и изменяется от 0,9

(при двухлетнем сроке службы) до 1,4 (при годовом); $C_{об}$ — первоначальная стоимость специального оборудования, оснастки и инструмента, включая затраты на их проектирование, коп.

Устанавливая структуру годовых издержек производства на основе технологической себестоимости операции, необходимо иметь в виду, что некоторые из них будут зависеть от размера годового выпуска изделий $П$ и в общей сумме изменяться (с известной условностью) прямо пропорционально ему, другие же мало зависят от выпуска и остаются примерно постоянными.

К изменяющимся затратам относятся расходы на основной материал $C_м$, заработную плату рабочих $C_з$, а также расходы, связанные с работой универсального оборудования, включая технологическую оснастку, инструмент, энергию и др. К неизменяющимся затратам относятся расходы по эксплуатации специального оборудования, оснастки, инструмента, включая их проектирование, а также заработная плата наладчика и др. Изменяющиеся затраты рассчитывают на единицу изделия, неизменяющиеся—на всю годовую программу изделий.

Размер годовой программы, при которой сравниваемые варианты становятся равноценными, определяют по формуле

$$П_р = \frac{C_2 - C_1}{V_1 - V_2},$$

где C_1 и C_2 — общая сумма условно-постоянных расходов соответственно по первому и второму вариантам, рассчитанных на годовую программу изделий; V_1 и V_2 — общая сумма условно-переменных расходов на единицу изделия по первому и второму вариантам.

Эта формула дает возможность определить величину годовой программы изделий, при которой обеспечивается окупаемость дополнительных капитальных затрат на оборудование, оснастку, подготовку процесса производства и т. д. при более дорогом варианте (например, при алмазной обработке) за счет экономии на условно-переменных расходах. Если заданный объем производства изделий больше величины равноценной программы $П_р$, можно внедрять более дорогой по капитальным затратам вариант, поскольку он оправдан экономией на расходах, пропорциональных объему производства. Если же заданный объем производства меньше величины равноценной программы, на такие затраты идти нельзя, и, следовательно, предпочтение должно быть отдано менее дешевому по капитальным затратам варианту.

Расчет отдельных элементов затрат, входящих в технологическую себестоимость операций по абразивной или алмазной обработке изделий, обычно начинают с определения затрат на заработную плату основного рабочего (коп/ч):

$$C_з = C_т K_{доп} K_{соц} K_{вн}, \qquad (8.2)$$

где $C_т$ — часовая тарифная ставка рабочего соответствующего разряда; $K_{доп}$ — коэффициент, учитывающий размер дополнительной заработной платы (берут по фактическим данным или равным 1,09); $K_{соц}$ — коэффициент, учитывающий размер начислений соцстраху (берут равным 1,077); $K_{вн}$ — коэффициент, учитывающий размер сдельного приработка (берут по фактическим данным или равным 1,3).

Себестоимость машино-часа базового станка, машино-коэффициент которого принимают за единицу, определяют по данным базового предприятия или по формуле

$$C_{мч}^{баз} = \frac{P_о}{i K_м Ф_д K_з},$$

где $P_о$ — итог годовой (квартальный, месячный) сметы затрат по содержанию и эксплуатации оборудования, руб.; i — количество групп оборудования или рабочих мест; $K_м$ — средний машино-коэффициент для данной группы рабочих мест (при отсутствии заводских данных значения $K_м$ можно брать по табл. 8.4 или получить расчетным путем, пользуясь формулой (8.3); $Ф_д$ — действительный

Таблица 8.1

Минимальные значения базового машино-часа $C_{мч}^{баз}$ [22]

Тип производства	Режим сменности		
	1	2	3
Единичное и мелкосерийное	34,3	28,1	25,7
Серийное	40,3	33,0	30,4
Крупносерийное и массовое	49,8	40,6	37,3

годовой фонд времени работы единицы оборудования (определяют расчетом или берут по данным табл. 8.9), ч; $K_з$ — средний коэффициент загрузки оборудования по данной группе рабочих мест (берут по фактическим данным завода).

Если на базовом предприятии отсутствуют данные о себестоимости машино-часа работы оборудования, то для оценки вариантов технологических процессов можно воспользоваться минимальными их значениями, приведенными в табл. 8.1.

Величину $C_{мч}^{баз}$ можно использовать для расчета расходов по содержанию оборудования и эксплуатации рабочих мест на 1 ч эксплуатации или на одно изделие за T мин трудоемкости. Зная себестоимость машино-часа базового станка и машино-коэффициент данного станка, нетрудно, перемножив первое на второе, найти себестоимость машино-часа этого станка, не прибегая к поэлементному расчету. Числовые значения машино-коэффициентов для некоторых отечественных станков приведены в табл. 8.4. Для станков, не включенных в таблицу, их значения можно определить расчетным путем как для серийного, так и для массового производства. Для шлифовальных станков расчетная формула имеет вид

$$K_м = \left(\frac{5{,}07Ц}{1000} + 1{,}11P + 0{,}63M_у\right)\frac{1}{20}, \qquad (8.3)$$

где $Ц$ — балансовая стоимость станка, определяемая как сумма оптовой цены станка и затрат на транспортировку и монтаж, составляющих 10—15% от оптовой цены, руб.; $P = P_м + P_э$ — суммарная ремонтная сложность механической и электрической частей станка [17, 36]; $M_у$ — установленная мощность двигателей станка, кВт.

Величину часовых затрат (коп/ч) искомого станка можно определить по формуле

$$C_{мч} = C_{мч}^{баз} K_м. \qquad (8.4)$$

В случае пониженной загрузки станка, если, например $K_з < 60\%$ и станок не может быть дозагружен, величина часовых затрат должна быть скорректирована с помощью поправочного коэффициента

$$\varphi = 1 + \frac{\alpha\,(1 - K_з)}{K_з},$$

где α — коэффициент, показывающий удельный вес условно-постоянных расходов в структуре часовых затрат по данному рабочему месту (принимают по табл. 8.4, а при отсутствии табличных данных берут равным 0,3—0,6).

Скорректированная величина часовых затрат (коп/ч)

$$C_{чз.\,к} = \frac{\varphi}{1{,}14}.$$

Иногда сравниваемые варианты технологических процессов отличаются размерами производственной площади. В этом случае возникает необходимость

Таблица 8.2

Базовая величина часовых затрат $C_{чз}^{баз}$ [22]

Тип производства	Режим сменности		
	1	2	3
Единичное и мелкосерийное	37,7	30,9	28,3
Серийное	44,3	36,3	33,4
Крупносерийное и массовое	54,8	44,6	41,0

в определении величины затрат, связанных с эксплуатацией и содержанием рабочего места по вариантам. Часовые затраты по эксплуатации рабочего места можно определить с помощью коэффициентов часовых затрат. Для этого достаточно базовую величину часовых затрат $C_{ч.з}^{баз}$ умножить на коэффициент часовых затрат $K_{ч.з}$, т. е.

$$C_{ч.з} = C_{ч.з}^{баз} K_{ч.з}. \quad (8.5)$$

Значения коэффициентов часовых затрат приведены в табл. 8.4. Базовую величину часовых затрат определяют по данным предприятия или по табл. 8.2.

При выборе варианта следует исходить из минимизации не только текущих, но и приведенных затрат. Последние удобнее всего относить к часу работы на конкретном рабочем месте. Относительные величины этих затрат в виде коэффициентов часовых приведенных затрат на эксплуатацию рабочего места $K_{п.з}$ образуют третью подсистему коэффициентов затрат.

Часовые приведенные затраты (табл. 8.3) и их коэффициенты предназначены для ускоренной и уточненной оценки вариантов техники. Они включают текущие затраты по статьям, изменяющимся по вариантам; приведенные к текущим затратам и часу работы капитальные вложения в относящиеся к данному рабочему месту оборудование и здание.

К первым относятся часовая (основная и дополнительная с начислениями) заработная плата оператора, а также часовые затраты по эксплуатации рабочего места. Вторые представляют собой первоначальную стоимость оборудования и здания, отнесенные к часу работы оборудования, умноженную на нормативный коэффициент экономической эффективности капитальных вложений.

При нормальной загрузке станков ($K_з \geqslant 60\%$) часовые приведенные затраты (коп/ч) определяют как произведение

$$C_{п.з} = K_{п.з} C_{п.з}^{баз}. \quad (8.6)$$

Таблица 8.3

Часовые приведенные затраты $C_{пз}^{баз}$ на базовых рабочих местах при разных типах производства и режимах сменности, коп. [17]

Тип производства	Количество смен		
	1	2	3
Единичное и мелкосерийное	118,0	86,5	75,7
Серийное	125,0	92,0	81,0
Крупносерийное и массовое	136,0	101,0	88,5

При вынужденной малой загрузке (обычно для специальных станков) часовые приведенные затраты определяют по формуле

$$C_{п.\,з} = K_{п.\,з}\varphi l C_{п.\,з}^{баз},$$

где $K_{п.\,з}$ — коэффициент часовых приведенных затрат (определяют по данным табл. 8.4); $C_{п.\,з}^{баз}$ — величина часовых приведенных затрат на базовом рабочем месте (определяют по данным предприятия или по табл. 8.3); l — коэффициент для корректирования величины часовых приведенных затрат при недостаточной загрузке оборудования ($K_з < 60\%$);

$$l = 1 + \frac{\alpha_п (0{,}8 - K_з)}{K_з},$$

где $\alpha_п$ — удельный вес постоянной части расходов в $C_{п.\,з}$ (определяют по данным табл. 8.4).

Приведенные затраты на одно изделие

$$P_{п.\,и} = C_{п.\,з} T_с = K_{п.\,з} C_{п.\,з}^{баз} T_с, \qquad (8.7)$$

где $T_с$ — станкоемкость изделия, т. е. плановая станкоемкость с учетом выполнения норм и нормы многостаночного обслуживания (трудоемкость операции $T_с = \frac{T_ш}{K_в}$).

Годовой экономический эффект, или приведенная экономия по сопоставляемым вариантам составит

$$Э = (C_{п.\,з_1} T_{с_1} - C_{п.\,з_2} T_{с_2}) = \frac{П}{60 \cdot 100},$$

или

$$Э = (K_{п.\,з_1} T_{с_1} - K_{п.\,з_2} T_{с_2}) \frac{П C_{п.\,з}}{60 \cdot 100},$$

или

$$Э = (P_{п.\,и_1} - P_{п.\,и_2}) П,$$

где $П$ — годовая программа выпуска изделий.

При оценке выбираемого оборудования удобнее пользоваться следующими формулами:

$$\left.\begin{aligned} &K_{п.\,з_1}\Phi_1 > K_{п.\,з_2}\Phi_2; \\ &Э = (K_{п.\,з_1}\Phi_1 - K_{п.\,з_2}\Phi_2)\frac{C^{баз}}{100}, \end{aligned}\right\} \qquad (8.8)$$

где Φ_1 и Φ_2 — соответственно фонды времени, необходимые для выполнения годовой программы при использовании первого или второго станка, ч.

Следовательно, при оценке вариантов применения техники следует выбирать такое оборудование, которое имеет минимальное произведение $K_{п.\,з}\Phi$. Это правило исходит из предположения, что другие статьи затрат, не отраженные в $C_{п.\,з}$, не изменяются. Если же, например, в сравниваемых вариантах изменяются расходы на материалы или снижается разряд работы в отличие от принятого в $C_{п.\,з}$, то следует произвести прямой расчет этих затрат и соответственно уменьшить или увеличить экономию.

Для оборудования с неизвестным $K_{п.\,з}$ и вычисленной поправкой $\varphi_п$ вместо $K_{п.\,з}$ можно в формулу (8.8) подставить $\varphi_п K_м$.

Таким образом, при оценке вариантов технологических процессов, различающихся применяемой оснасткой или инструментом (например, замена абразивного круга на алмазный), расчет следует вести с помощью машино-коэффициентов $K_м$ и себестоимости машино-часа базового станка $C_{мч}^{баз}$. Если варианты технологии имеют различные затраты по эксплуатации производственных площадей, а также организации и охране труда, расчет технологической себестоимости операций следует вести с помощью коэффициентов часовых затрат $K_{ч.з}$ и себестоимости часовых затрат базового рабочего места $C_{ч.з}^{баз}$.

Выбор варианта техники (замена одного станка другим) следует производить с помощью коэффициентов часовых приведенных затрат $K_{п.з}$ и величины часовых приведенных затрат на базовом рабочем месте $C_{п.з}^{баз}$.

В табл. 8.4 приведены три подсистемы коэффициентов $K_м$, $K_{ч.з}$, $K_{п.з}$, а также коэффициенты удельных весов постоянных расходов $\alpha_м$, $\alpha_ч$, $\alpha_п$ для определения поправок на загрузку рабочих мест $\varphi_м$, $\varphi_ч$, $\varphi_п$. Для станков, не включенных в табл. 8.4, значения коэффициенто-машино-часа можно определить по формуле (8.3) или пользуясь литературой [19, 22].

Таблица 8.4

Индивидуальные коэффициенты затрат на некоторое оборудование для алмазной и абразивной обработки [22]

Тип и марка станка	Коэффициенты затрат и поправок					
	$K_м$	$\alpha_м$	$K_{ч.з}$	$\alpha_ч$	$K_{п.з}$	$\alpha_п$
Круглошлифовальные:						
316М	1,7	0,20	1,7	0,28	1,7	0,22
3161	1,9	0,22	1,9	0,29	1,8	0,24
3А161	2,7	0,33	2,7	0,37	2,4	0,36
3Б161	2,2	0,34	2,2	0,40	2,2	0,35
3162	2,3	0,26	2,2	0,32	2,0	0,28
3164	2,8	0,34	2,9	0,42	2,8	0,35
3164А	2,8	0,28	2,9	0,38	2,9	0,35
3А164	3,5	0,43	3,5	0,48	3,3	0,46
3174	7,0	0,48	7,1	0,53	6,2	0,58
3421	2,2	0,30	2,2	0,38	2,1	0,34
3433	1,4	0,26	1,4	0,26	1,6	0,20
К4250/50	1,8	0,25	1,8	0,32	1,8	0,26
2Р1000	1,3	0,20	1,3	0,30	1,5	0,21
ХШВ1	15,8	0,74	15,1	0,75	14,4	0,76
ХШ201	3,5	0,63	3,9	0,67	4,3	0,58
Бесцентрово-шлифовальные:						
3180	2,6	0,20	2,5	0,24	2,1	0,25
3181	2,2	0,31	2,2	0,34	2,1	0,32
3182	3,6	0,36	3,5	0,39	2,9	0,39
3Г182	3,0	0,20	2,9	0,24	2,3	0,25
3184	3,3	0,26	3,2	0,29	2,6	0,31
СБЩ01	2,1	0,15	2,1	0,24	1,9	0,20
Внутришлифовальные:						
3225	1,5	0,50	1,5	0,55	1,8	0,37
3А227	2,2	0,43	2,2	0,47	2,2	0,39
3А228	3,0	0,42	2,9	0,45	2,6	0,41
3А229	3,2	0,46	3,1	0,50	2,9	0,46
3А240	1,2	0,24	1,2	0,32	1,5	0,21
3250	1,4	0,36	1,4	0,43	1,7	0,29
3А250	1,8	0,36	1,7	0,42	1,9	0,32
3Б250	1,7	0,50	1,7	0,55	2,0	0,40
3А251	2,3	0,50	2,2	0,55	2,3	0,45
3256	1,3	0,36	1,3	0,44	1,6	0,29

Тип и марка станка	Коэффициент затрат и поправок					
	$K_м$	$\alpha_м$	$K_{ч.з}$	$\alpha_ч$	$K_{п.з}$	$\alpha_п$
Обдирочно-шлифовальные:						
332Б	0,7	0,04	0,7	0,20	1,2	0,10
3Б632	1,2	0,18	1,2	0,28	1,4	0,18
3Б633	0,8	0,08	0,8	0,22	1,2	0,12
3Б634	0,8	0,16	0,8	0,29	1,2	0,16
3М634	0,7	0,03	0,8	0,19	1,2	0,10
3М635	0,7	0,04	0,8	0,39	1,3	0,16
3М636	0,9	0,07	0,9	0,19	1,2	0,12
КШ-1	0,8	0,09	0,8	0,20	1,2	0,12
Шлицешлифовальные:						
345	3,1	0,58	3,0	0,60	3,0	0,52
3451А	2,4	0,42	2,2	0,46	2,4	0,40
Плоскошлифовальные:						
3530	3,8	0,30	3,8	0,40	3,9	0,44
3544	5,4	0,42	5,3	0,46	4,7	0,50
Заточные:						
360	1,0	0,29	1,1	0,40	1,4	0,23
360М	1,1	0,36	1,2	0,45	1,5	0,28
3625	0,8	0,17	0,8	0,24	1,2	0,14
3Б625	0,7	0,21	0,8	0,33	1,2	0,16
3628	0,9	0,19	0,9	0,30	1,3	0,17
3Б632В	0,8	0,24	0,8	0,36	1,3	0,18
3662	1,0	0,34	1,1	0,34	1,5	0,27
3А64	0,7	0,21	0,8	0,34	1,2	0,17
3А64М	0,8	0,10	0,9	0,24	1,2	0,12
3А642	1,1	0,23	1,1	0,32	1,4	0,20
3Б652	0,5	0,11	0,6	0,29	1,1	0,12
3А64Д	0,7	0,29	0,8	0,40	1,2	0,20
3659А	0,9	0,22	0,9	0,33	1,3	0,19
3659М	1,1	0,24	1,1	0,33	1,4	0,20
3662	1,2	0,35	1,2	0,43	1,6	0,28
3667	1,0	0,17	1,0	0,29	1,3	0,17
3667М	0,9	0,24	0,9	0,35	1,3	0,20
2692	0,8	0,23	0,9	0,35	1,2	0,18
Т27	0,6	0,11	0,6	0,29	1,1	0,12
Плоскошлифовальные:						
371	1,3	0,18	1,3	0,28	1,5	0,19
371М	1,2	0,18	1,2	0,28	1,4	0,19
371М1	1,1	0,21	1,2	0,30	1,4	0,20
3Г71	1,6	0,27	1,6	0,33	1,7	0,26
372Б	1,4	0,17	1,5	0,27	1,6	0,20
3Б722	2,8	0,36	2,8	0,41	2,5	0,38
373	1,7	0,22	1,7	0,30	1,7	0,24
3724	4,1	0,40	4,1	0,45	3,8	0,45
3Б724	4,5	0,44	4,4	0,48	4,1	0,48
3740	2,0	0,37	1,9	0,42	2,0	0,34
3756	2,1	0,35	2,2	0,43	2,1	0,36
3А756	2,3	0,26	2,3	0,32	2,1	0,30
МШ-100	2,0	0,57	2,0	0,60	2,2	0,45

Тип и марка станка	Коэффициенты затрат и поправок					
	$K_м$	$\alpha_м$	$K_{ч.з}$	$\alpha_ч$	$K_{п.з}$	$\alpha_п$
Горизонтальные алмазно-расточные:						
2А715	1,3	0,24	1,4	0,33	1,8	0,20
2А716	1,5	0,31	1,5	0,38	1,7	0,28
2792	2,1	0,38	2,2	0,47	2,5	0,35
ЛР153	9,6	0,69	9,0	0,70	7,9	0,71
3110М	1,5	0,34	1,5	0,41	1,7	0,30
312М	1,6	0,30	1,6	0,37	1,7	0,28
3Б12	2,1	0,37	2,1	0,42	2,1	0,35
3Г12М	1,4	0,17	1,4	0,27	1,5	0,20
3130	2,2	0,30	2,2	0,34	2,1	0,32
3А130	2,4	0,34	2,4	0,39	2,3	0,35
3131	2,3	0,41	2,3	0,46	2,3	0,40
315М	1,7	0,28	1,7	0,35	1,8	0,28
3А150	2,7	0,35	2,5	0,39	2,3	0,35
3151	1,6	0,22	1,6	0,30	1,7	0,23
3А151	2,7	0,32	2,6	0,36	2,3	0,34
3Б151	2,6	0,32	2,5	0,37	2,3	0,34
3153	1,7	0,37	1,7	0,42	1,9	0,32
3153С3	1,5	0,30	1,5	0,38	1,7	0,28
Доводочные:						
3Д814	0,7	0,24	0,8	0,38	1,5	0,29
3Д814М	0,9	0,19	1,0	0,47	1,2	0,20
3818М	0,7	0,11	0,7	0,27	1,2	0,12
Хонинговальные:						
383	1,8	0,36	1,8	0,42	1,9	0,32
ОФ20	1,0	0,28	1,1	0,37	1,4	0,23
Ленточно-полировальный 3854	1,1	0,34	1,1	0,42	1,5	0,25
Полировальный С42М	1,6	0,03	0,7	0,22	1,1	0,09
Шпоночно-полировальный ШПС	0,7	0,07	0,8	0,22	1,2	0,11
Оптический профилешлифовальный 395М	2,0	0,39	2,0	0,44	2,3	0,32

При внедрении синтетических алмазов или других сверхтвердых материалов варианты технологических процессов могут различаться применяемой технологической оснасткой и инструментом, что вызывает необходимость точного расчета затрат на оснастку и инструмент. Затраты по технологической оснастке ($C_{ос}$), приходящиеся на операцию, охватывают затраты на амортизацию и ремонт приспособления и другой специальной оснастки. Их можно получить на основе годовых приближенных затрат на единицу оборудования либо, когда известны стоимость приспособлений и сроки их службы, определить по формуле

$$C_{пр} = \frac{(Б_{пр}K_{пр} - P_{пр})\,П_{пр}M_{пр}}{T_{пр}П_г} \text{ руб./опер.,} \qquad (8.9)$$

где $Б_{пр}$ — балансовая стоимость единицы приспособления, руб. (некоторые данные о стоимости приспособлений приведены в табл. 8.5); $K_{пр}$ — коэффициент, учитывающий затраты на ремонт приспособлений (для приближенных расчетов его величина может быть взята в пределах 1,5—1,6 от балансовой стоимости приспособления); $P_{пр}$ — выручка от реализации приспособления после выбытия его из эксплуатации, руб./шт. (определяют в соответствии с характером его утилизации); $П_{пр}$ — количество единиц приспособлений одного типоразмера, входящих в комплект, для выполнения операции; $M_{пр}$ — коэффициент занятости приспособлений при выполнении операции; $T_{пр}$ — срок службы приспособлений (определяют по нормативам или фактическим данным; можно брать от 3 до 5 лет); $П_г$ — годовая производственная программа деталей, шт.

Таблица 8.5

Себестоимость станочных приспособлений (руб.) [17]

Показатели	Группа сложности приспособлений					
	I	II	III	IV	V	VI
Число оригинальных деталей в приспособлении	1—10	5—20	10—30	20—60	30—90	60—120
Себестоимость приспособления, руб.	До 10	10—25	20—50	50—150	100—300	220—460

Более точно себестоимость изготовления станочных приспособлений может быть определена по номограммам [17]. Затраты на эксплуатацию специального инструмента ($C_и$), приходящиеся на операцию, охватывают расходы на его амортизацию, заточку и восстановление. Величину затрат на инструмент определяют по-разному, в зависимости от того, является ли инструмент цельным или сборным, универсальным или специальным, а также от того, в каких единицах (в часах полезной работы, штуках) измеряется суммарная стойкость инструмента. Расходы на алмазный инструмент, приходящиеся на операцию, рассчитывают по формуле

$$C_и = \frac{Ц_и + n_п З_п}{C_{сл}} K_и \text{ коп./опер.},$$

где $Ц_и$ — первоначальная стоимость инструмента (определяют по действующим ценникам на инструмент или по фактическим затратам на его изготовление); $n_п$ — число переточек инструмента до полного износа (устанавливают по заводским или отраслевым нормативам, а для новых инструментов — экспериментальным путем); $З_п$ — себестоимость одной переточки (определяют по нормативам, фактическим данным или путем расчета по методу коэффициенто-машино-часа соответствующего оборудования); коп.; $C_{сл}$ — срок службы инструмента до полного износа [определяют как произведение его экономической стойкости на число переточек плюс единица, т. е. $C_{сл} = T_{ст}(n_п + 1)$, ч; $K_и$ — коэффициент, учитывающий время занятости инструмента на данной операции (определяется отношением времени резания к штучному времени на операцию, т. е. $K_и = \frac{T_{рез}}{T_{шт}}$).

Затраты по абразивным и алмазным кругам, приходящиеся на данную операцию, определяют в зависимости от того, в каких единицах (в часах полезной работы, в штуках) измеряют суммарную стойкость круга. Величина затрат (руб./опер.) на круги при абразивном или алмазном шлифовании может быть определена, например, по формуле

$$C_и = \frac{(Ц_и - P_и) + n_{прав} З_{прав} K_{уб}}{q_{ст}}, \qquad (8.10)$$

где $Ц_и$ — стоимость круга данного типоразмера, руб. (определяют по ценникам на абразивный или алмазный инструмент); $P_и$ — выручка от реализации изношенного круга, руб. (изношенные абразивные круги реализуют по цене отходов, корпуса изношенных алмазных кругов реализуют по цене металлолома); $n_{прав}$ — количество правок круга в течение года; определяют делением годовой программы деталей $П_г$ на количество деталей, которые может обработать круг за один период стойкости $T_{кд}$ ($T_{кд}$ устанавливают по заводским или отраслевым нормативам или экспериментальным путем); $З_{прав}$ — затраты на одну правку круга (определяют по нормативам, средним фактическим данным или прямым расчетом по методу коэффициенто-машино-часа); $K_{уб}$ — коэффициент, учиты-

вающ ий случайную убыль кругов (определяют по нормативным данным в зависимости от размера и вида круга; его величина колеблется в пределах 1,0—1,5 для абразивных кругов и в пределах 1,0—1,02 для алмазных кругов [13, 17]); $q_{ст}$ — суммарная стойкость круга, шт.; для абразивных и алмазных кругов она зависит от условий эксплуатации кругов. Измеряется $q_{ст}$ количеством деталей, которое может обработать круг за весь срок службы. Величину стойкости кругов принимают на основании опытных или фактических данных.

С внедрением методов алмазной обработки происходит изменение затрат по обрабатываемым изделиям в результате повышения их стойкости, надежности и долговечности в процессе эксплуатации. Величину этих затрат (в руб./шт.) при определении себестоимости операций алмазной обработки и доводки инструмента определяют по формуле [11]

$$C_{и.\,обр} = Ц_{и.\,обр} + C_{пер}\,(n_{ст} - 1),$$

где $Ц_{и.\,обр}$ — стоимость единицы обрабатываемого режущего инструмента, руб./шт. (для случаев, когда предприятие покупает готовый инструмент, уже прошедший алмазную обработку, величину $Ц_{и.\,обр}$ определяют как сумму прейскурантной цены и транспортно-заготовительных расходов предприятия в размере 1—2% от прейскурантной цены; в случае, когда предприятие само изготовляет инструмент, величина $Ц_{и.\,обр}$ представляет собой себестоимость изготовления инструмента с учетом затрат на алмазную обработку); $C_{пер}$ — затраты на одну переточку обрабатываемого инструмента, руб./шт. (определяют расчетным путем по приведенному выше методу коэффициенто-машино-часа или по фактическим данным); $n_{ст}$ — число периодов стойкости инструмента.

В тех случаях, когда внедрение абразивной или алмазной обработки деталей приводит к уменьшению реальной величины брака, имевшего место до ее внедрения, в себестоимости продукции необходимо учитывать затраты на брак $C_{бр}$. Затраты на брак, включаемые в себестоимость деталей, рассчитывают по-разному для исправимого и неисправимого брака. Если брак неисправим, то величина затрат на брак (в руб.) может быть определена по формуле

$$C_{бр} = (Ц_{бр} - Q_{бр}Ц_{отх})\,K_{бр}П_г,$$

где $Ц_{бр}$ — производственная себестоимость бракованных деталей, руб./шт.; $Q_{бр}$ — масса бракованных деталей (для инструмента — масса твердого сплава), кг/шт.; $Ц_{отх}$ — цена отходов по материалу детали, руб./кг; $K_{бр}$ — коэффициент, учитывающий величину неисправимого брака; $П_г$ — годовая программа изделий, шт.

Если неисправимый брак обнаружен у потребителя изделий, затраты на брак должны учитывать все расходы предприятия-изготовителя, связанные с устранением последствий брака. Расходы по исправимому браку, приходящиеся на изделие, определяют суммой затрат (в руб.) на его исправление:

$$C_{бр} = \sum_{1}^{z} C_{бр}П_г,$$

где z — число операций по исправлению брака; $C_{бр}$ — величина затрат по исправлению брака на каждой операции.

Себестоимость годового объема обработки изделий (в руб.) с учетом затрат на брак

$$C_г = C_{т.\,г} + C_{бр}.$$

Поясним методику расчета технологической себестоимости по методу коэффициенто-машино-часа примерами.

Пример 1. В механическом цехе завода запланирована к внедрению замена абразивного круга на связке К5, применяемого при шлифовании детали на станке 3Б722, на круг тех же размеров на связке К10. Требуется определить эффективность замены. Тип производства серийный. Режим работы двухсменный.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 8.6.

В данном примере варианты различаются лишь применяемым при шлифовании инструментом, поэтому расчет технологической себестоимости сравниваемых операций следует вести исходя из стоимости машино-часа базового станка и машино-коэффициента станка 3Б722 в следующей последовательности.

Таблица 8.6

Исходные данные

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателей	
		при 1-м варианте	при 2-м варианте
Годовая программа выпуска детали, шт.	$П$	40 000	40 000
Норма штучного времени, ч	$T_ш$	0,25	0,2
Норма машинного времени, ч	$T_м$	0,2	0,15
Часовая тарифная ставка оператора, руб.	$C_{т.о}$	0,637	0,637
Дополнительная заработная плата, руб.	$K_д$	1,09	1,09
Отчисления в соцстрах, руб.	$K_с$	1,077	1,077
Коэффициент выполнения норм	$K_в$	1,3	1,3
Цена абразивного круга, руб.	$Ц_и$	8,8	10,0
Количество деталей, обрабатываемых за один период стойкости круга, шт.	$T_{к.д}$	8	16
Количество правок, выдерживаемых кругом за весь его срок службы	$n_{пр}$	1300	1300
Затраты на одну правку, руб.	$З_{прав}$	0,06	0,06
Коэффициент случайной убыли кругов	$K_{уб}$	1,0	1,0

1. По формуле (8.2) определяют расходы на заработную плату оператора за час его работы:

$$C_в = C_{т.с} K_д K_с K_в = 0{,}637 \cdot 1{,}09 \cdot 1{,}077 \cdot 1{,}3 = 0{,}976 \text{ р.}$$

2. По табл. 8.1 определяют минимальное значение машино-часа работы базового станка для серийного типа производства: $C_{мч}^{баз} = 0{,}33$ р.

3. По табл. 8.4 определяют значение коэффициенто-машино-часа для станка 3Б722: $K_{мч} = 2{,}8$.

4. Определяют расходы на абразивный инструмент. Количество правок круга на годовую программу деталей определяют по формуле $n_{пр} = \frac{П}{T_{к.д}}$; для первого варианта $n_{пр_1} = \frac{40\,000}{8} = 5000$ правок/год, для второго варианта $n_{пр_2} = \frac{40\,000}{16} = 2500$ правок/год.

Суммарную стойкость круга (количество деталей, которое может обработать один круг за весь срок службы) определяют из условия задачи:

по первому варианту $q_{ст_1} = 8 \cdot 1300 = 10400$ шт.;

по второму варианту $q_{ст_2} = 16 \cdot 1300 = 20\,800$ шт.

Подставив полученные значения в формулу (8.10), определяют расходы на инструмент:

по первому варианту $C_{и_1} = \frac{(Ц_и - P_и) + n_{прав} З_{пр} K_{уб}}{q_{ст}} =$

$$= \frac{8{,}8 + 5000 \cdot 0{,}06 \cdot 1}{10400} = 0{,}029 \text{ р;}$$

по второму варианту

$$C_{и_2} = \frac{10 + 2500 \cdot 0{,}06 \cdot 1}{20\,800} = 0{,}0073 \text{ р.}$$

Затраты на абразивный инструмент на годовую программу деталей

$$C_{и.г_1} = 0{,}029 \cdot 40\,000 = 1160 \text{ р.;} \quad C_{и.г_2} = 0{,}0073 \cdot 40\,000 = 292 \text{ р.}$$

5. По формуле (8.1) определяют технологическую себестоимость операций по вариантам:

$$C_{т_1} = \left(T_ш C_в + C_{мч}^{баз} T_м K_м\right) П + T_{п.з} C_{в.н} + C_н =$$

$$= (0{,}25 \cdot 0{,}976 + 0{,}33 \cdot 0{,}2 \cdot 2{,}8)\, 40\,000 + 1160 = 18\,400 \text{ р.;}$$

$$C_{т_2} = 0{,}2 \cdot 0{,}976 + 0{,}33 \cdot 0{,}15 \cdot 2{,}8)\, 40\,000 + 292 = 11\,796 \text{ р.}$$

6. Определяют условно-годовую экономию от замены абразивного круга на более прогрессивный:

$$Э_{у.\,г} = C_{T_1} - C_{T_2} = 18\,400 - 11\,796 = 6604 \text{ р.}$$

Пример 2. Планом повышения эффективности производства на машиностроительном заводе предусматривается перевод обработки детали с круглошлифовального станка 3164А на более производительный круглошлифовальный станок 3Б161. Требуется определить эффективность предстоящего изменения технологического процесса операции. Исходные данные для расчета приведены в табл. 8.7.

Таблица 8.7

Исходные данные для расчета (массовое производство, двухсменная работа)

Наименование показателя	Обозначение	Значение показателей	
		до внедрения	после внедрения
Годовая программа деталей, шт.	$П$	100 000	100 000
Норма штучного времени, ч	$T_{ш}$	0,25	0,105
Коэффициент выполнения норм операции	$K_{в}$	1,2	1,2

В данном случае речь идет о замене одного станка другим, т. е. изменяются все показатели работы, поэтому расчет экономической эффективности следует вести исходя из часовых приведенных затрат на базовом рабочем месте и коэффициента приведенных затрат станков 3164А и 3Б161. Расчет представлен в табл. 8.8.

Таблица 8.8

Порядок расчета

Наименование определяемых показателей	Расчетная формула	Расчет	
		1-го варианта	2-го варианта
Станкоемкость операции, ч	$T_{с} = \frac{T_{ш}}{K_{в}}$	$\frac{0,25}{1,2} = 0,208$	$\frac{0,105}{1,2} = 0,088$
Часовые приведенные затраты на базовом рабочем месте $C_{мч}^{баз}$, руб.	См. табл. 8.3	1,01	1,01
Коэффициент приведенных затрат $K_{п.\,з}$	Табл. 8.4	2,9	2,2
Приведенные затраты на одну деталь, руб.	$C_{п.з} = C_{п.\,з}^{баз} \times K_{п.\,з} T_{с}$	$1,01 \cdot 2,9 \times 0,208 = 0,61$	$1,01 \cdot 2,2 \times 0,088 = 0,195$
Годовой экономический эффект, руб.	$Э = (C_{п.\,з} - C_{п.\,з})\,П$	$(0,61 - 0,195)\,100\,000 = 41\,500$ р.	

§ 8.2. Экономическая оценка эффективности абразивной и алмазной обработки

Широкое внедрение синтетических сверхтвердых материалов на предприятиях различных отраслей промышленности, расширение областей их применения, включение в планы по новой технике мероприятий по внедрению в производство методов абразивной и алмазной обработки требует правильной оценки экономической эффективности этих методов.

Определение экономической эффективности внедрения указанных методов необходимо для принятия решения об экономической целесообразности внедрения методов абразивной и алмазной обработки изделий; текущего и перспектив-

ного планирования эффективности мероприятий по внедрению новых синтетических сверхтвердых материалов; установления величины необходимых капитальных вложений для внедрения методов абразивной и алмазной обработки; проведения технико-экономического анализа результатов внедрения; установления размеров материального поощрения за внедрение новой технологии.

При определении экономической эффективности от внедрения новых синтетических материалов на предприятии необходимо выяснить два вопроса: 1) насколько технически прогрессивно данное мероприятие; 2) какова величина экономического эффекта, который получит предприятие от его внедрения в определенных конкретных условиях.

Для ответа на первый вопрос при определении показателей экономической эффективности внедряемого мероприятия в качестве исходной принимают лучшую действующую технологию. Для получения ответа на второй вопрос для сравнения в качестве исходной принимают заменяемую данным мероприятием технологию, действующую на предприятии или имеющую наибольшее распространение в отрасли.

При внедрении новых синтетических сверхтвердых материалов возможны следующие варианты решений технической задачи: 1) внедрение мероприятия по абразивной или алмазной обработке не требует дополнительных капитальных вложений в оборудование и оснастку, а связано с заменой абразивного или алмазного круга одной характеристики на более прогрессивную; 2) внедрение мероприятия по абразивной или алмазной обработке связано с заменой универсального оборудования и инструмента на специальное оборудование, инструмент и оснастку и т. д. т. е. требует дополнительных капитальных затрат; 3) внедрение новых синтетических сверхтвердых материалов связано с заменой существующего технологического процесса (внедрение операции алмазного точения взамен шлифования и т. д.).

Когда внедрение новых синтетических сверхтвердых материалов не вызывает необходимости в дополнительных капитальных вложениях, годовой экономический эффект рассчитывают по формуле

$$Э = C_1 - C_2 \text{ или } Э = (C_1 - C_2)\, П_г,$$

где C_1 и C_2 — себестоимость единицы продукции (операции до и после внедрения абразивной или алмазной обработки); $П_г$ — годовой объем производства продукции после внедрения абразивной или алмазной обработки.

Размер капитальных вложений (в руб.), необходимых предприятию для внедрения абразивной или алмазной обработки, определяют по формуле

$$K = K_{тр} - K_{выс},$$

где $K_{тр}$ — требуемые капитальные вложения; $K_{выс}$ — высвобождаемые капитальные вложения при внедрении абразивной или алмазной обработки на том же предприятии (учитываются в случаях, когда вследствие внедрения новых сверхтвердых синтетических материалов каких-либо из ранее применявшихся средств больше не требуется и они могут быть использованы по другому назначению).

Величина капитальных вложений в требуемые для внедрения абразивной или алмазной обработки средства состоит в основном из вложений в оборудование $K_{об}$ и в приспособления $K_{пр}$, т. е.

$$K_{тр} = K_{об} + K_{пр}.$$

Величину капитальных вложений в оборудование ($K_{об}$) по данному процессу абразивной обработки определяют по формуле

$$K_{об} = Б_{об} n_{об} \mu_{об},$$

где $Б_{об}$ — балансовая стоимость единицы технологического оборудования с учетом затрат на транспортировку и монтаж; $n_{об}$ — количество технологического оборудования, занятое на выполнении данной операции; $\mu_{об}$ — коэффициент занятости технологического оборудования при выполнении данной операции.

Расчетное количество оборудования, необходимое для выполнения годовой программы деталей, находят по формуле

$$n_{об} = \frac{T_{шт} П_г}{60 K_{в.н} Ф_д K_з},$$

где $K_{в.н}$ — коэффициент, учитывающий выполнение норм (принимают по фактическим данным завода); $K_з$ — коэффициент загрузки оборудования во времени (для мелкосерийного производства принимают равным 0,85; для крупносерийного 0,80; для массового 0,70) [17]; $Ф_д$ — действительный годовой фонд времени работы оборудования (данные о величине действительного годового фонда времени работы оборудования приведены в табл. 8.9).

Таблица 8.9

Действительный годовой фонд времени работы металлорежущих станков (в ч) [17]

Категория ремонтной сложности станков	Действительный годовой фонд времени работы станка при работе		
	в одну смену	в две смены	в три смены
1—30	2000	3950	5870
Св. 30	—	3830	5500

Капитальные вложения в приспособления рассчитывают по формуле

$$K_{пр} = Б_{пр} n_{пр}.$$

Кроме перечисленных выше капитальных вложений, необходимых для процесса абразивной или алмазной обработки, в отдельных случаях требуется учитывать и другие капитальные вложения (в специальные сооружения и устройства, в средства контроля и управления и т. д.). В тех случаях, когда в сравниваемых вариантах обеспечиваются одинаковые результаты по объему выпускаемой продукции и ее качеству, экономический эффект от внедрения абразивной или алмазной обработки определяют по разности приведенных затрат на производство годового объема продукции до и после внедрения мероприятия:

$$Э = (C_1 + E_н K_1) - (C_2 + E_н K_2), \qquad (8.11)$$

где C_1 и C_2 — соответственно себестоимости годового выпуска продукции до и после внедрения алмазной или абразивной обработки, руб.; K_1 и K_2 — соответственно капиталовложения в производственные фонды до и после внедрения абразивной или алмазной обработки; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности (принимают действующий в данной отрасли нормативный коэффициент, но не ниже 0,12).

В случае, если внедрение новых сверхтвердых синтетических материалов обеспечивает рост объема производства, годовой экономический эффект рассчитывают по формуле

$$Э = [(C_1' + E_н K_{уд_1}) - (C_2' + E_н K_{уд_2})] П_{г_2},$$

где C_1' и C_2' — соответственно себестоимости единицы изделия (операции) до и после внедрения новых методов обработки; $K_{уд_1}$ и $K_{уд_2}$ — соответственно удельные капитальные вложения до и после внедрения абразивной или алмазной обработки (рассчитывают как отношение общей суммы капитальных затрат по вариантам к годовой программе изделий после внедрения абразивной или алмазной обработки); $П_{г_2}$ — годовая программа изделий после внедрения абразивной или алмазной обработки.

Кроме этого, в данном случае к полученной экономии следует присовокупить относительную экономию условно-постоянной части накладных расходов в себестоимости продукции, определяемую по формуле

$$Э_н = \frac{(П_{г_2} - П_{г_1}) H_у}{100 П_{г_1}},$$

где $H_у$ — процент условно-постоянной части накладных расходов в себестоимости продукции, или

$$Э_н = \frac{K H_у}{100},$$

где K — процент прироста объема производства продукции.

При использовании новых синтетических сверхтвердых материалов, как правило, изменяются не только затраты на изготовление изделий, но и их потребительские свойства. В связи с этим годовой экономический эффект от внедрения этих материалов следует определять с учетом затрат как в сфере производства, так и в сфере потребления изделий улучшенного качества.

Годовой экономический эффект определяют с учетом изменений капитальных вложений и себестоимости изделий как у производителей, так и у потребителей:

$$Э = Э_{пр} + Э_{потр} = (C_1 + E_н K_1) - (C_2 + E_н K_2) + (C_1 - C_2)\, П_г + E_н (K_1 - K_2),$$

где $C_1 + E_н K_1$ — приведенные затраты на производство годового объема старой продукции, эквивалентного годовому объему новой продукции; $C_2 + E_н K_2$ — приведенные затраты на производство годового объема новой продукции; C_1 и C_2 — соответственно себестоимости единицы продукции у потребителя до и после повышения качества; $П_г$ — годовая программа изделий повышенного качества; $E_н$ — нормативный коэффициент эффективности; K_1 и K_2 — дополнительные капитальные вложения у потребителя, связанные с использованием продукции до и после повышения ее качества.

Если в результате внедрения новых методов обработки качество выпускаемых изделий улучшено, то на эти изделия может быть установлена новая оптовая цена (или надбавка к прежней цене). В этом случае годовой экономический эффект, получаемый заводом-изготовителем, может быть определен по формуле

$$Э_{пр} = Ц_2 - (C_2 + E_н K_2) - Ц_1 - (C_1 + E_н K_1),$$

где $C_2 + E_н K_2$ — приведенные затраты на производство годового объема изделий улучшенного качества; $C_1 + E_н K_1$ — приведенные затраты на производство годового объема изделий прежнего качества, эквивалентного годовому объему изделий повышенного качества; $Ц_2$ — стоимость (цена) годового объема выпуска продукции улучшенного качества, исчислена по новым оптовым ценам; $Ц_1$ стоимость годового объема продукции прежнего качества, эквивалентная при потреблении годовому объему продукции улучшенного качества, исчисленная по ранее действующим оптовым ценам.

При определении сравнительной экономической эффективности внедрения новых синтетических сверхтвердых материалов необходимо наряду со сравнительной определять и общую (абсолютную) экономическую эффективность как отношение эффекта (прибыли) ко всей сумме капитальных вложений, необходимых для внедрения абразивной или алмазной обработки:

$$Э_{кп} = \frac{Ц - C}{K} = \frac{П}{K},$$

где $Ц$ — стоимость годового выпуска изделий, обрабатываемых с помощью новых сверхтвердых синтетических материалов, в оптовых ценах предприятия (без налога с оборота) руб.; C — себестоимость годового выпуска изделий, руб.; $П$ — прибыль предприятия, полученная в результате реализации продукции, обработанной с помощью новых синтетических сверхтвердых материалов, руб.

По предприятиям, где применяют расчетные цены, показатель общей экономической эффективности характеризуется отношением экономии от снижения себестоимости продукции, обработанной с помощью новых синтетических сверхтвердых материалов, к вызвавшим эту экономию капитальным затратам:

$$Э_{ск} = \frac{C_1 - C_2}{K}.$$

Для более тесной увязки технико-экономических результатов внедрения новых синтетических сверхтвердых материалов с производственно-финансовыми показателями деятельности предприятия необходимо наряду с годовым экономическим эффектом определять и прирост прибыли ($П$), который рассчитывают по формуле

$$П = [(Ц_2 - C_2) - (Ц_1 - C_1)]\, П_г,$$

при неизменных ценах у потребителя

$$П = (C_1 - C_2)\, П_г.$$

Срок окупаемости капитальных вложений определяют как отношение дополнительных вложений к снижению себестоимости, или полученной прибыли в сравниваемых вариантах:

$$T = \frac{K_2 - K_1}{C_1 - C_2},$$

или

$$T = \frac{K_2 - K_1}{Ц - C} = \frac{K}{П},$$

где K_1 и K_2 — капитальные вложения по сравниваемым вариантам; C_1 и C_2 — себестоимости годового объема продукции по сравниваемым вариантам.

Обобщающим показателем оценки результатов внедрения синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов для обработки изделий служит экономический эффект в рублях, отнесенный к 1 карату израсходованных алмазов:

$$Э = \frac{Э}{П_{алм}}, \qquad (8.12)$$

где $Э$ — годовой экономический эффект, полученный от внедрения алмазной обработки, руб.; $П_{алм}$ — потребность в синтетических алмазах для внедряемого процесса алмазной обработки, карат.

Потребность в алмазах для данного вида обработки определяют по формуле

$$П_{алм} = \frac{П_г}{q_{ст}} B, \qquad (8.13)$$

где $q_{ст}$ — суммарная стойкость круга, шт./период; B — содержание алмазов в круге данного типоразмера, караты.

Некоторые частные случаи определения экономической эффективности внедрения абразивной и алмазной обработки

Методика расчета экономического эффекта от применения алмазной заточки и доводки режущего инструмента. В последние годы на многих машиностроительных заводах стали широко применять алмазную заточку и доводку инструмента вместо заточки кругами из карбида кремния и доводки электрокорундом.

Определение экономической эффективности этого мероприятия следует проводить поэтапно: 1) определение экономии вследствие увеличения сроков

службы инструмента; 2) определение экономии вследствие сокращения расходов по заточке инструмента; 3) определение экономии при обработке деталей инструментом, заточенным разными способами; 4) определение суммарной экономии.

На первом этапе устанавливают стойкость инструмента до и после введения алмазной заточки и доводки и определяют коэффициент изменения стойкости:

$$K_{ст} = C_п : C_д. \quad (8.14)$$

Далее устанавливают количество переточек инструмента до $n^п_{и_1}$ и после $n^п_{и_2}$ введения алмазной заточки и определяют коэффициент изменения числа переточек:

$$K_{пер} = \left(n^п_{и_1} + 1\right) : \left(n^п_{и_2} + 1\right). \quad (8.15)$$

Произведение этих двух коэффициентов дает величину общего коэффициента изменения сроков службы инструмента

$$K_{ср} = K_{ст} K_{пер}. \quad (8.16)$$

Если обозначить через $П_д$ и $П_п$ соответственно потребность в инструменте до и после алмазной заточки, то, учитывая коэффициент изменения его сроков службы, потребность в инструменте после перехода на алмазную заточку и доводку будет

$$П_п = П_д : K_{ст}. \quad (8.17)$$

Отсюда определяем экономию, которая может быть получена за тот или иной период (обычно за год) под влиянием этого первого фактора:

$$Э_1 = Ц\,(П_д - П_п), \quad (8.18)$$

где $Ц$ — цена (или себестоимость) единицы инструмента.

Второй этап расчетов заключается в определении экономии на расходах по заточке инструмента. Начинается он с расчета штучного времени $T_ш$ до и после введения алмазной заточки, часовой (основной и дополнительной с начислениями) заработной платы станочника-заточника $C_з$ и на этой основе величины расходов по заработной плате на заточку инструмента для каждого из способов:

$$З_п = T_ш C_з. \quad (8.19)$$

После этого определяют машинное время на заточку инструмента $T_{маш}$, себестоимость машино-часа заточного станка $C_{мч}$ и, как произведение этих величин, расходы по эксплуатации станка, приходящиеся на один инструмент при разных способах заточки:

$$Р_э = T_{маш} C_{мч}. \quad (8.20)$$

Зная эти исходные данные, можно определить общую сумму затрат на заточку и доводку, изменяющихся для каждого из способов обработки, с учетом программы $П$ и общего числа инструмента до полного износа:

$$З = (З_п + Р_э)\,П\,(n_п + 1). \quad (8.21)$$

Разница в величине этих затрат до ($З_д$) и после ($З_п$) перехода на алмазную заточку дает представление о размере годовой экономии в результате влияния второго из рассматриваемых факторов:

$$Э_2 = З_д - З_п. \quad (8.22)$$

Третий этап расчетов, на котором необходимо определить экономию, получаемую при обработке определенных деталей с помощью инструмента, заточенного старым и новым способами, по своей методике аналогичен предыдущему, разница состоит лишь в том, что эти расчеты ведут применительно к тем станкам, на которых обрабатывают данные детали.

В результате определяют экономию, получаемую при обработке этих деталей (или по всем станкам, где применяют инструмент данного вида):

$$Э_3 = P_д - P_п = (З_{п_1} + P_{о_1}) П_д - (З_{п_2} + P_{о_2}) П_д, \qquad (8.23)$$

где $П_д$ — годовая программа по данным деталям.

Заключительным этапом расчетов является определение суммарной экономии от проводимого мероприятия:

$$Э_{общ} = Э_1 + Э_2 + Э_3. \qquad (8.24)$$

Практика показывает, что в большинстве случаев наибольшая экономия получается непосредственно при обработке деталей. Однако, когда при обработке применяют дорогие инструменты, экономия за счет увеличения сроков их службы и сокращения затрат на переточку также оказывается весьма значительной.

Нередко задача об определении экономии от перехода на алмазную заточку и доводку инструмента ставится не в отношении каких-то отдельных деталей, а применительно для всего цеха, который полностью (или по отдельным группам станков или видам инструмента) перешел на этот метод работы.

Не меняя содержания, последовательности и целенаправленности, расчеты экономии в таких случаях все же следует вести несколько по-другому. Методической основой таких расчетов на первых двух этапах является определение изменений в расходе твердого сплава до и после внедрения алмазной заточки и доводки, а на третьем этапе расчет ведут на все число станков и рабочих, пользующихся инструментом, заточенным алмазным кругом.

Само собой разумеется, что подсчитанная тем или иным методом суммарная экономия должна быть сопоставима с размером капитальных затрат, связанных с организацией и внедрением алмазной заточки и доводки, и на основании такого сопоставления установлены степень экономической эффективности капитальных затрат или срок их окупаемости.

Поясним изложенную выше методику примером.

Пример 1. Требуется определить экономический эффект от перехода механического цеха на алмазную заточку и доводку инструмента. Исходные данные для расчета приведены в табл. 8.10.

Расчет экономической эффективности от внедрения алмазной заточки и доводки инструмента рекомендуется вести в следующей последовательности.

1. Определяют экономию, отнесенную на 1 кг твердого сплава, получаемую за счет увеличения срока службы инструмента:

а) коэффициент изменения стойкости инструмента по формуле (8.17)

$$K_{ст} = C_п : C_д = 180 : 60 = 3;$$

коэффициент изменения числа переточек по формуле (8.15)

$$K_{пер} = (n_{и_1} + 1) : (n_{и_2} + 1) = 8 : 5 = 1{,}6;$$

общий коэффициент изменения срока службы инструмента по формуле (8.16)

$$K_{ср} = K_{ст} K_{пер} = 3 \cdot 1{,}6 = 4{,}8;$$

б) количество инструментов, которое можно изготовить из 1 кг твердого сплава до и после перехода на алмазную обработку,

$$П_{и_1} = \frac{1000}{q} = \frac{1000}{15} = 67 \text{ шт}; \quad П_{и_2} = \frac{П_{и_1}}{K_{ср}} = \frac{67}{4{,}8} = 14 \text{ шт}.$$

Экономия, получаемая за счет увеличения срока службы инструмента, составит

$$Э_1 = Ц_и (П_{и_1} - П_{и_2}) = 0{,}9\ (67 - 14) = 47{,}7 \text{ р}.$$

2. Определяют экономию за счет сокращения затрат на заточку и доводку инструмента:

а) расходы на заработную плату заточников

$$З_{п_1} = T_{ш_1} (n_{и_1} + 1) П_{и_1} З_{п.\,з_1} = 0{,}125\ (4 + 1)\ 67 \cdot 0{,}64 = 26{,}8 \text{ р.};$$

$$З_{п_2} = 0{,}07\ (7 + 1)\ 14 \cdot 0{,}64 = 5{,}05 \text{ р.};$$

Таблица 8.10

Исходные данные для расчета

Наименование показателей	Условное обозначение	Показатели	
		до внедрения мероприятия	после внедрения мероприятия
Годовой расход твердого сплава на изготовление инструмента, кг	$P_г$	425	425
Средняя стойкость инструмента, мин	$в$	60	190
Среднее число переточек	$П_и$	4	7
Средний расход твердого сплава на один инструмент, г	q	15	15
Средняя стоимость инструмента, руб.	$Ц_и$	0,9	0,9
Средние затраты времени на одну заточку, ч	$T_ш$	0,125	0,07
Машинное время, ч	$T_м$	0,113	0,062
Часовая основная и дополнительная (с начислениями) заработная плата заточников, руб.	$З_{п.з}$	0,64	0,64
Часовая основная и дополнительная (с начислениями) заработная плата основных рабочих цеха, руб.	$З_{п.р}$	0,72	0,72
Себестоимость машино-часа заточных станков, руб.	$C_{мч.з}$	0,48	0,82
Средняя стоимость машино-часа оборудования цеха, руб.	$C_{мч.об}$	0,6	0,6
Фонд рабочего времени за смену, ч	$T_{см}$	6,7	6,7
Экономия рабочего времени в связи с уменьшением потерь на смену инструмента и повышением режима обработки, %	$Э_{вр}$	—	10
Численность основных рабочих цеха	$P_р$	100	100
Количество рабочих смен в сутки	—	2	2
Дополнительные капитальные затраты, связанные с внедрением алмазной обработки инструмента, руб.	$K_{доп}$	—	40 000

б) расходы по эксплуатации заточного оборудования

$$P_{O_1} = T_{м_1}(n_{и_1} + 1)\,П_{и_1} C_{мч.з_1} = 0{,}113\,(4 + 1)\,67 \cdot 0{,}48 = 18{,}22 \text{ р.};$$

$$P_O = 0{,}062\,(7 + 1)\,14 \cdot 0{,}82 = 5{,}7 \text{ р.};$$

в) общую сумму затрат на заточку и доводку инструмента

$$З_1 = З_{п_1} + P_{O_1} = 26{,}8 + 18{,}22 = 45{,}02 \text{ р.};$$

$$З_2 = З_{п_2} + P_{O_2} = 5{,}05 + 5{,}7 = 10{,}75 \text{ р.}$$

Экономия за счет изменения затрат по заточке и доводке инструмента составит

$$Э_з = 45{,}02 - 10{,}75 = 34{,}27 \text{ р.}$$

Общая сумма экономии, подсчитанная по этим двум статьям на 1 кг твердого сплава, составит $47{,}7 + 34{,}27 = 81{,}97$ р.

При годовом расходе твердого сплава 425 кг до перехода на алмазную заточку и доводку годовая экономия от изменения сроков службы инструмента и расхода по его заточке составит $425 \cdot 81{,}97 = 34{,}837$ р.

Следует отметить, что в примере не учтены расходы на заточку и доводку из-за небольшой величины этих расходов. Из заводских данных известно, что разовые затраты на эти материалы при карборундовой заточке составляют примерно 0,05—0,08 к., а при алмазной 0,2—0,3 к, так что на 1 кг твердого сплава они колеблятся от 0,1 до 0,16 р. при заточке карборундовыми кругами и до 0,2—0,3 р, при алмазной заточке. Считаем, что при столь укрупненных расчетах, методика которых здесь была изложена, такими затратами можно пренебречь.

3. Рассчитывают экономию, получаемую по цеху, переведенному на использование инструмента, заточенного и доведенного алмазными кругами.

Принимаем фонд рабочего времени смены 400 мин, экономию штучного и машинного времени от уменьшения потерь на смену инструмента и применения форсированных режимов (по данным заводов, от 8 до 15%) $Э_{вр} = 0{,}67$ ч, среднюю часовую заработную плату рабочих $З_{пр} = 0{,}72$ р., среднюю стоимость машино-часа оборудования $C_{мч.об} = 0{,}6$ р, общее количество рабочих в одной смене $P_{см} = 50$ человек (количество работающих в цехе $P_р = 100$ человек). При двухсменной работе ($C=2$) в числе рабочих дней в году 305, общий размер экономии на заработной плате и расходах, связанных с работой оборудования, составит

$$Э = Э_{вр}CD\,(З_{пр} + C_{мч})\,P_{см} = 0{,}67 \cdot 2 \cdot 305\,(0{,}72 + 0{,}6)\,50 = 27151{,}08 \text{ р.}$$

На заводах эту экономию обычно не подсчитывают, что, конечно, в большой степени занижает экономическую эффективность проводимого мероприятия. Подобный расчет необходимо проводить по всем видам инструмента, оснащенного твердым сплавом и переводимого на алмазную заточку, раздельно по группам.

Общая сумма экономии по цеху составит $Э = 34\,837 + 27\,151{,}08 = 60\,988{,}08$ р. Годовой экономический эффект с учетом дополнительных капитальных затрат на внедрение алмазной обработки инструмента составит

$$Э_г = Э - (E_н K_{доп}) = 60{,}988 - (0{,}3 \cdot 40\,000) = 48\,988 \text{ р.}$$

Окупаемость дополнительных капитальных вложений

$$T_{ок} = \frac{K_{доп}}{Э} = \frac{40\,000}{60\,988} = 0{,}66 \text{ года.}$$

Методика расчета экономического эффекта от повышения стойкости инструмента. Практика широкого внедрения заточки и доводки инструмента алмазами вместо обычных абразивов показывает, что их использование ведет к увеличению стойкости инструмента, снижению шероховатости обработанной поверхности. При этом достигается экономия за счет сокращения расхода инструмента в результате повышения его стойкости, уменьшения затрат по заработной плате (как следствие сокращения трудоемкости обработки), а также сокращения расхода абразивного круга. Расчет экономии рекомендуется вести в следующей последовательности.

1. Определение экономии затрат по заработной плате заточника за счет сокращения трудоемкости обработки режущего инструмента:

$$Э_з = (C_{п_1} T_{ш_1} - C_{п_2} T_{ш_2})\,П_{г.\,р}, \tag{8.25}$$

где $C_{п_1}$ и $C_{п_2}$ — расходы на заработную плату заточника до и после внедрения алмазной обработки; $T_{ш_1}$ и $T_{ш_2}$ — норма времени на заточку одного инструмента до и после внедрения алмазной обработки; $П_{г.р}$ — количество перетачиваемого инструмента за один год.

2. Определение экономии за счет сокращения расходов, связанных с работой заточного оборудования, вследствие сокращения трудоемкости заточки:

$$Э_о = (T_{м.\,з_1} - T_{м.\,з_2}) C_{мч.\,з} П_{г.\,р}. \tag{8.26}$$

3. Определение экономии затрат по инструменту за счет повышения стойкости кругов:

$$З_и = C_{и_1} - C_{и_2}; \tag{8.27}$$

$$C_и = \frac{(Ц_и - P_и) + n_{прав} З_{прав} K_{уб}}{q_{ст}}\,П_{г.\,р}.$$

4. Расчет экономии по инструменту, работающему при неизменных скоростях резания с повышенной стойкостью:

$$Э_v = П_v \frac{П_v}{K_{ст}}\,Ц_и, \tag{8.28}$$

где $П_v$ — количество инструмента, работающего при неизменных скоростях резания с повышенной стойкостью; $K_{ст}$ — коэффициент повышения стойкости инструмента (при неизменных скоростях резания); $Ц_и$ — цена инструмента, руб.

Пример 2. В инструментальном цехе машиностроительного завода внедрена алмазная заточка инструмента, вследствие чего значительно сокращено рабочее время на заточку и повышена стойкость токарных проходных резцов сечением 16×25 мм. Требуется определить годовой экономический эффект от внедрения данного мероприятия.

Краткая характеристика действующего технологического процесса: заточку твердосплавных токарных проходных резцов сечением 16×25 мм производят на станке 3Б625 абразивными кругами ПП 350×40×127, 63С25СМ1 К, а доводку резцов на том же станке алмазными кругами АЧК 150×5×3×32 АСО50/40Б1 100%.

Краткая характеристика внедряемого процесса: заточку тех же резцов производят на станке 3662 кругами АЧК 150×10×3×32 АСО125/100М5 100%, а при переточках кругами АПП 150×10×3×32 АСО50/40Б2 150%.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 8.11.

Таблица 8.11

Исходные данные для расчета

Наименование показателей	Условное обозначение	Показатели	
		Базовый вариант	Проект
Годовая программа резцов, шт.	$П_р$	200 000	200 000
Норма штучного времени на заточку одного резца, мин	$T_{шт}$	3,0	1,5
Машинное время (в том числе), мин	$T_м$	2,5	1,0
Часовая тарифная ставка заточника, руб.	$C_{т.з}$	0,52	0,52
Коэффициент, учитывающий дополнительную заработную плату	$K_д$	1,09	1,09
Коэффициент, учитывающий отчисления в фонд соцстраха	$K_с$	1,077	1,077
Коэффициент, учитывающий перевыполнение норм	$K_в$	1,3	1,3
Стойкость/стоимость шлифовальных кругов, шт./руб.:	$\frac{q_{ст}}{Ц_и}$		
абразивного		$\frac{100}{4,7}$	—
алмазного для заточки			$\frac{5000}{37,7}$
алмазного для доводки		$\frac{90000}{8,7}$	
Количество правок абразивного круга	$n_{пр}$	40	—
Затраты на одну правку, руб.	$З_{прав}$	0,35	—
Цена твердосплавного проходного резца сечением 16×25 мм, руб.	$Ц_и$	0,34	0,34
Коэффициент повышения стойкости резцов	$K_{ст}$	—	1,3

Расчет годового экономического эффекта. 1. Экономию затрат по заработной плате заточника вследствие снижения трудоемкости заточки определяем по формуле (8.25):

$$Э_з = C_р K_д K_с K_в (T_{ш_1} - T_{ш_2}) П_р = 0,52 \cdot 1,09 \cdot 1,077 \cdot 1,3 \left(\frac{3 - 1,5}{60}\right) 200\,000 = 4000 \text{ р.}$$

2. Экономию затрат от сокращения расходов, связанных с эксплуатацией рабочего места, рассчитываем исходя из снижения приведенных затрат по вариантам [формула (8.26)]:

$$Э_о = \left(T_{м_1} C^{баз}_{п.з} K_{м_1} - T_{м_2} C^{баз}_{п.з} K_{м_2}\right) П_р =$$

$$= \left(\frac{2,5}{60} 0,92 \cdot 1,3 - \frac{1,0}{60} 0,92 \cdot 1,5\right) 200\,000 = 5400.$$

3. Экономию затрат по инструменту в результате повышения стойкости кругов определяем по формуле (8.27):

$$Э_и = C_{и_1} - C_{и_2} = \left[\left(\frac{4,7 + 40 \cdot 0,35}{100} + \frac{8,7}{90000}\right) - \frac{37,7}{5000}\right] 200\,000 = 37\,200 \text{ р.}$$

4. Экономию в эксплуатации за счет повышения стойкости резцов и сокращения их расхода на годовую программу изделий определяем по формуле (8.28):

$$Э = \left(П_р - \frac{П_р}{K_{ст}}\right) Ц_и = \left(200\,000 - \frac{200\,000}{1,3}\right) 0,34 = 15\,600 \text{ р.}$$

5. Годовой экономический эффект от применений алмазной заточки резцов составит

$$Э_г = Э_э + Э_о + Э_и + Э_р = 62\,200 \text{ р.}$$

Методы укрупненного расчета экономического эффекта от внедрения алмазной обработки изделий

Укрупненные расчеты экономической эффективности от внедрения в производство синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов вместо абразивов на практике можно использовать для предварительной оценки суммарного значения экономического эффекта при разработке годовых и перспективных планов по внедрению методов алмазной обработки изделий, а также для упрощенных расчетов по проведенным работам, когда нет необходимости в детальном учете всех изменений себестоимости продукции по элементам затрат.

В первом случае расчет можно производить на основании усредненных показателей экономического эффекта, отнесенных к одному карату внедряемых алмазов. Ожидаемый экономический эффект можно рассчитать по формуле

$$Э_о = Э' П_{алм}, \tag{8.29}$$

где $Э'$ — экономический эффект, отнесенный к одному карату внедряемых синтатических алмазов; $П_{алм}$ — потребность предприятия в алмазах, караты.

Значения $Э'$ и $П_{алм}$ определяют на основе показателей, полученных при проведении аналогичных расчетов на других предприятиях, а также рекомендаций отраслевых институтов.

Экономическая эффективность от применения алмазного и абразивного инструмента (алмазных кругов, брусков, паст и т. д.) составляет, по данным промышленных предприятий, 2,5—5 р. в расчете на один карат алмазов в инструменте, а по некоторым видам алмазных правящих и лезвийных инструментов — до 40—50 р. на карат. В укрупненных расчетах значение $Э'$ можно брать в пределах 3—5 р. на карат.

Потребность предприятия в синтетических алмазах можно рассчитать по формуле

$$П_{алм} = П_г P, \tag{8.30}$$

где $П_г$ — годовая программа изделий в натуральном (шт.) или ценностном выражении (руб.); P — удельный расход синтетических алмазов, карат/шт. или карат/руб., или по формуле

$$П_{алм} = n_{об} P', \tag{8.31}$$

где $n_{об}$ — количество станков, переводимых на алмазную обработку, шт.; P' — среднее значение удельного расхода синтетических алмазов на один станок в год, каратов/станок.

При внедрении методов алмазной обработки и доводки инструментов для ориентировочных расчетов среднее значение удельного расхода инструмента из синтетических алмазов может быть принято в следующих размерах: на 1 тыс. руб. потребляемого инструмента всего — 37 каратов, твердосплавного — 110. На один установленный заточной станок, переведенный на алмазную обработку (при двухсменной работе),— 600 каратов/год [25, 29].

Пример 3. Определить ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения синтетических алмазов для операции заточки и доводки металлорежущего инструмента. Исходные данные для расчета приведены в табл. 8.12.

Таблица 8.12

Исходные данные для расчета

Наименование показателей	Условное обозначение	Значение показателей	
		до внедрения	после внедрения
Годовой объем производства инструмента, руб.	$П_р$	110 000	110 000
Удельный расход синтетических алмазов, карат/1000 р.	P	—	37,0
Среднее значение экономии, отнесенной к одному карату алмазов, руб.	$Э'$	—	5,0

Потребность завода в синтетических алмазах после внедрения

$$П_{алм} = П_р P = 110 \cdot 37 = 4070 \text{ карат.}$$

Ожидаемый годовой экономический эффект

$$Э_0 = Э' П_{алм} = 5 \cdot 4070 = 20\,350 \text{ р.}$$

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Абрамсон С. И., Гельфельд О. М., Левина Г. М.** Шлифование с повышенными режимами резания. — «Вестник машиностроения», 1974, № 2, с.

2. **Абразивные** инструменты из эльбора. Каталог. М., НИИМАШ, 1973. 58 с.

3. **Автоматическая** балансировка алмазных кругов при их вращении. — «Синтетические алмазы», Киев, 1970, № 2, с. 73—76. Авт.: Я. С. Бровман, Л. З. Вартанян, А. Е. Саркисян, С. Л. Шмутер.

4. **Агабабян А. Г., Бровман Я. С., Микаелян В. В.** Станок для автоматической электрохимической балансировки алмазных кругов. — «Синтетические алмазы». Киев, 1973, № 2, с. 66—68.

5. **Алмазное** выглаживание автомобильных деталей. — «Автомобильная промышленность», 1967, № 6, с. 31—34. Авт.: П. В. Черников, Л. П. Соколов, В. А. Шляпина, Г. А. Старчик.

6. **Алмазные** инструменты с упорядоченным расположением зерен. — «Синтетические алмазы», 1972, № 1, с. 13—15. Авт.: Е. С. Виксман, М. М. Жук, Б. Е. Спивак, Д. Н. Шнайдер.

7. **Алмазы** и технический прогресс. М., ВНИИАЛМАЗ, 1973, 133 с.

8. **Андреев В. С., Пилинский В. И., Бородина Г. Р.** Влияние температуры термообработки на прочностные характеристики алмазных кругов. — В кн.: Совершенствование технологических процессов и инструментов в машиностроении. Куйбышевское книжное изд-во, 1970, с. 122—125.

9. **Бабичев А. П.** Вибрационная обработка деталей. М., «Машиностроение», 1974, 133 с.

10. **Бакуль В. Н.** Сверхтвердые материалы как фактор технического прогресса в условиях социалистической экономической интеграции. — «Синтетические алмазы», Киев, 1974, № 6, с. 18—24.

11. **Бакуль В. Н., Гинзбург Б. И.** Эффективность промышленного применения синтетических алмазов. УкрНИИНТИ, 1965. 51 с.

12. **Бакуль В. Н., Захаренко И. П.** Эффективность обработки режущего инструмента кругами из синтетических алмазов. Киев, «Техника», 1966. 26 с.

13. **Бакуль В. Н., Кункин Я. А.** Эффективность алмазной доводки режущего инструмента из быстрорежущих сталей. Киев, «Техника», 1966, 24 с.

14. **Бакуль В. Н., Прихна А. И.** Новый сверхтвердый материал — исмит. — «Синтетические алмазы», 1973, № 6, с. 29—30.

15. **Бакуль В. Н., Прихна А. И.** Состав, структура и свойства кубического нитрида бора. — «Синтетические алмазы», 1971, № 1, с. 36—42.

16. **Барац Я. И.** Исследование процесса алмазного выглаживания сталей. Автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. Куйбышевский политехнический институт, 1968, 28 с.

17. **Барташев Л. В.** Технико-экономические расчеты при проектировании и производстве машин. М., «Машиностроение», 1973, 384 с.

18. **Вал Е. И.** Исследование процесса затачивания металлорежущего инструмента кругами из кубонита. Автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. Куйбышевский политехнический институт, 1972, 28 с.

19. **Великанов К. М., Власов В. Ф., Карандашева К. С.** Экономика и организация производства в дипломных проектах. Л., «Машиностроение», 1973. 256 с.

20. **Верезуб В. Н.** Шлифование абразивными лентами. М., «Машиностроение» 1972, 104 с.

21. **Выглаживание** деталей инструментом из синтетических алмазов типа баллас. — «Алмазы», 1969, № 1, с. 35—38. Авт.: М. С. Пивоваров, С. Л. Гаранчук, А. И. Голенко, Ю. Г. Кравченко, В. П. Коверга, В. М. Горелик.

22. **Гамрат-Курек Л. И., Иванов К. Ф.** Выбор варианта изготовления изделий и коэффициенты затрат. М., «Машиностроение», 1975, 134 с.

23. **Гебель И. Д., Хроленко В. Ф.** Шлифование на неподвижных осевых и радиальных опорах. — «Станки и инструмент», 1973, № 7, с. 26—27.

24. **Гексанит-Р** — новый сверхтвердый материал для обработки закаленных сталей и чугунов. — «Синтетические алмазы», 1974, № 6, с. 24—28. Авт.: В. И. Трофимов, И. Н. Францевич, А. Н. Пилянчевич, Г. Г. Карюк, М. С. Пивоваров, А. В. Бочко, В. П. Барабан, Ю. Б. Горячкин, В. В. Федосеев, Н. И. Непопушев, А. И. Голенко, Г. Б. Виноградова, В. Ю. Поволоцкий, А. Е. Резников, Ю. И. Литвишко.

25. **Гинзбург Б. И., Зисман М. С., Мишнаевский Л. Л.** Определение экономической эффективности алмазного шлифования. Киев, «Техника», 1972, 56 с.

26. **Глаговский Б. А., Яшин В. А.** О погрешностях измерения статистического баланса шлифовальных кругов. — «Абразивы и алмазы», 1965, № 8, с.

27. **Горбунов Б. И., Гусев В. А.** Анализ устройства для устранения эксплуатационной неуравновешенности шлифовального круга на станке. — «Вестник машиностроения», 1974, № 1, с. 50—55.

28. **Грановский Э. Г.** Исследование износостойкости алмазных инструментов для выглаживания. — «Алмазы», 1969, № 1, с. 28—32.

29. **Гринберг Р. Я.** Методика определения технико-экономической эффективности применения алмазов. М., ВНИИАЛМАЗ, 1965. 18 с.

30. **Гурин Ф. В., Смелянский В. М.** Шероховатость и отклонение формы при алмазном выглаживании жестким инструментом. — В кн.: Размерно-чистовая и упрочняющая обработка поверхностным деформированием. Минск, АН БССР, 1968, с. 208.

31. **Давыдова Г. Е.** Исследование прочностных свойств абразивов и алмаза. Автореферат на соискание ученой степени канд. техн. наук. Грузинский политехнический институт, 1973, 26 с.

32. **Дерус П. С.** Тонкое растачивание и алмазное выглаживание высокоточных отверстий. — В кн.: Новые технологические процессы механической обработки и оборудование для их осуществления. М., НИИМАШ, 1966, с. 205—207.

33. **Добрин А. П., Ширво В. Л.** Эффективность обработки тормозных накладок отрезными кругами. — «Алмазы», 1973, № 7, с. 9—11.

34. **Друй М. С.** Исследование геометрических параметров зерен эльбора. — «Абразивы», 1970, № 6, с. 5—10.

35. **Едигерев Е. В., Цофин Э. Е.** Безопасность труда при работе абразивным инструментом. М., «Машиностроение», 1970. 160 с.

36. **Единая** система планово-предупредительного ремонта и рациональной эксплуатации технологического оборудования машиностроительных предприятий. Под ред. М. О. Якобсона. М., «Машиностроение», 1967, 591 с.

37. **Житницкий С. И.** — Глубинная алмазно-электролитическая заточка обдирочных резцов. «Синтетические алмазы», 1973, № 2, с. 32—35.

38. **Захаров В. П.** Нормы неуравновешенности шлифовальных кругов. — В кн.: Теория и практика балансировочной техники. М., «Машиностроение», 1973, с. 382—387.

39. **Зубков М. Я.** Силы резания при шлифовании быстрорежущих сталей кругами из эльбора. — В кн.: Резание и инструмент. Харьков. 1971. 103 с.

40. **Иванов Ю. И., Бородина Г. Р., Буров В. А.** Теплофизические свойства эльборовых и алмазных кругов. — «Алмазы», 1972, № 3, с. 5—6.

41. **Исследование** скоростного плоского шлифования керамики алмазными чашечными кругами. — «Синтетические алмазы», 1975, № 1, с. 52—55. Авт. В. А. Иванов, Н. В. Никитков, Д. Б. Ваксер, В. Б. Рабинович.

42. **Ипполитов Г. М.** Абразивно-алмазная обработка. М., «Машиностроение», 1969. 336 с.

43. **Каменкович А. С.** Конструкция, области применения и условия эксплуатации лезвийных инструментов, оснащенных композитом. Материалы выставки «Алмаз-75», М., НИИМАШ, 1975, 70 с.

44. **Кащук В. А., Мелехин Д. А., Барлин Б. П.** Справочник заточника. М., «Машиностроение», 1967. 219 с.

45. **Колев К. С.** Точность обработки и режимы резания. М., «Машиностроение», 1968. 130 с.

46. **Кошлев И. А.** Применение силового шлифования для снятия больших припусков. — «Вестник машиностроения», 1973, № 12, с. 36—38.

47. **Краснов Л. А.** Решение задачи о выборе оптимальной загрузки рабочей среды и высота контейнера виброабразивной установки. Труды Казанского авиационного института. Вып. 152. 1973, с. 49—52.

48. **Кремень. З. И.** Высокоскоростное круглое шлифование желобов колец подшипников. — «Абразивы», 1974, № 5, с. 1—6.

49. **Кривоухов В. А., Чубаров А. Д.** Обработка резанием титановых сплавов. М., «Машиностроение», 1970. 183 с.

50. Круг с эксцентричным расположением алмазоносного слоя. — «Синтетические алмазы», 1970, № 1, с. 58—61. Авт.: А. И. Садыков, Э. А. Тагиев, В. З. Мовла-Заде, И. П. Захаренко, А. А. Шепелев.

51. **Левин В. И.** Краткий справочник шлифовщика. М., «Машиностроение», 1968, 136 с.

52. **Лоскутов В. В., Тамбулатов В. Я., Перфильев Г. Л.** Измерение силы резания при внутреннем шлифовании. — «Станки и инструмент», 1971, № 5, с. 30—31.

53. **Лурье Г. Б.** Шлифование металлов. М., «Машиностроение», 1969, 175 с.

54. **Лурье Г. Б., Комиссаржевская В. Н.** Шлифовальные станки и их наладка. М., «Высшая школа», 1972, 415 с.

55. **Маслов Е. Н.** Теория шлифования материалов. М., «Машиностроение», 1974, 320 с.

56. **Мгеладзе В. Ф.** Исследование прочности шлифующей способности и насыпного веса промышленного зерна эльбора. — «Абразивы», 1973, № 1, с. 1—4.

57. **Металлорежущие** станки. Каталог-справочник. М., НИИМАШ. Ч. 4.5, 1971, с. 520; 508.

58. **Методика** определения экономической эффективности внедрения синтетических алмазов. Под ред. В. Н. Бакуля. Киев, «Наукова думка», 1974, 42 с.

59. **Механизация** заточки резцов. Куйбышевское книжное изд-во, 1966. 110 с. Авт.: В. И. Пилинский, Я. И. Барац, В. А. Данченко, Ю. М. Иванов.

60. **Михайлов О. П.** Корпус алмазного круга с регулируемыми размерами. — «Алмазы», 1972, № 9, с. 14—16.

61. **Михелькевич В. Н., Щукин Б. Д.** Системы автоматического регулирования технологических процессов шлифования. Кубышевское книжное изд-во, 1969. 152 с.

62. **Некоторые** вопросы скоростного бесцентрового шлифования. — «Абразивы», 1974, № 9, с. 20—24. Авт.: В. А. Еленский, А. К. Бабиченко, В. В. Марченко, И. Т. Давыдов.

63. **Новые** связки алмазно-абразивного инструмента. — «Синтетические алмазы», 1970, № 2, с. 52—55. Авт.: В. Н. Галицкий, В. А. Муровский, Е. С. Землянский, С. И. Мицинский.

64. **Обработка** металлов резанием. Под ред. Г. А. Монахова. Справочник технолога. М., «Машиностроение», 1974, 598 с.

65. **Обработка** резанием жаропрочных, высокопрочных и титановых сплавов. Под ред. Н. И. Резникова. М., «Машиностроение», 1972, 200 с.

66. **Определение** экономической эффективности внедрения алмазной заточки и доводки металлорежущего инструмента. Киев, «Техника», 1971. 70 с.

67. **Оситинская Т. Д., Вишневский А. С.** Определение удельной поверхности микропорошков синтетических алмазов. — «Синтетические алмазы», 1969, № 3, с. 1—3.

68. **Палей Л. Я., Воробьев И. Т.** Исследование стружкообразования и усилий при плоском глубинном шлифовании. — «Станки и инструмент», 1974, № 10, с. 36—37.

69. **Пивоваров М. С.** Особенности геометрических параметров синтетических алмазов. — «Алмазы», 1971, № 7, с. 8—9.

70. **Пилинский В. И.** Исследование качества абразивных кругов зарубежного производства. — «Абразивы», 1971, № 11, с. 18—20.

71. **Пилинский В. И., Николаев С. В.** Влияние неуравновешенности круга на процесс круглого шлифования. — «Абразивы», 1974, № 5, с. 8—11.

72. **Пилинский В. И., Николаев С. В.** Точность статического балансирования шлифовальных кругов. — «Вестник машиностроения», 1974, № 8, с. 36—38.

73. **Применение** инструмента из эльбора в промышленности. Руководящие материалы Министерства станкостроительной и инструментальной промышленности. М., НИИМАШ, 1974, 96 с.

74. **Производство** абразивных материалов. Л., «Машиностроение», 1968, 74 с. Авт.: А. С. Полубелова, В. Н. Крылов, В. В. Карлин, Н. С. Ефимова.

75. **Промышленные** испытания металлизированного эльбора в инструменте на органических связках. — «Абразивы», 1971, № 7, с. 17—19. Авт.: М. С. Друй, А. А. Лавринович, М. Г. Эфрос, А. К. Киселев, А. В. Григорьева.

76. **Пташников В. С.** Исследование процесса скоростного шлифования быстрорежущих сталей кругами из эльбора. — «Абразивы», 1974, № 4, с. 10—14.

77. **Работоспособность** алмазных отрезных кругов при резании шлакоситалла. — «Синтетические алмазы». 1973, № 1, с. 41—43. Авт.: А. Г. Миньков, Р. С. Золотарева, В. П. Марков, В. А. Апанасьева.

78. **Расчет** и конструирование аэростатических опор. Руководящие материалы. М., НИИМАШ, 1970. 38 с.

79. **Режимы** резания металлов. Под ред. Ю. В. Барановского. М., «Машиностроение», 1972. 407 с.

80. **Резание** труднообрабатываемых материалов. Под ред. П. Г. Петрухи. М., «Машиностроение», 1972. 176 с.

81. **Резников А. Н.** Краткий справочник по алмазной обработке. Куйбышевское книжное изд-во, 1967. 202 с.

82. **Резников А. Н.** Теплофизика резания. М., «Машиностроение», 1969. 288 с.

83. **Резников А. Н., Алексенцев Е. И.** Обработка титановых сплавов свободным ленточным шлифованием. — «Вестник машиностроения», 1972, № 6, с. 66—67.

84. **Резников А. Н., Барац Я. И.** Применение алмазного выглаживания для отделочно-упрочняющей обработки. — «Вестник машиностроения», 1970, № 1, с. 15—17.

85. **Резников А. Н., Мовла-Заде В. З.** Исследование устойчивости алмазных зерен в связке алмазно-абразивного инструмента. — «Синтетические алмазы», 1972, № 5, с. 5—10.

86. **Резников А. Н., Сагалович С. Я., Зеленкова А. П.** Алмазное шлифование резьбы твердосплавных калибров. — «Станки и инструмент», 1971, № 2, с. 21—24.

87. **Резников А. Н., Щипанов В. В.** Исследование мгновенной контактной поверхности при шлифовании. — «Вестник машиностроения», 1974, № 9, с. 64—66.

88. **Рейбах Ю. С.** Станки шлифовальной группы на выставке «Подшипники-74». — «Станки и инструмент», 1974, № 6, с. 34—38.

89. **Рейбах Ю. С., Зуперман С. М., Степанов Н. Л.** Устройство с волновым редуктором для балансировки шлифовальных кругов на станках. — «Станки и инструмент», 1974, № 7, с. 18—20.

90. **Рекач В. Г.** Руководство к решению задач по теории упругости. М., «Высшая школа», 1966. 227 с.

91. **Рубан Ф. Г., Ткаченко Л. А.** Исследование свойств керамической связки СК. — «Синтетические алмазы», 1973, № 2, с. 20—21.

92. **Руденко А. К., Кулакова И. И.** Роль калия в алмазоносности кимберлитов и износе алмазных инструментов. — «Алмазы», 1973, № 5, с. 3—6.

93. **Сагарда А. А., Чеповецкий И. Х., Мишнаевский Л. Л.** Абразивно-алмазная обработка деталей машин. Киев, «Техника», 1974. 180 с.

94. **Согоян М. Т., Грацианский Л. Н.** Отделочная обработка деталей синтетическими рубинами и сапфиром. — «Приборы и системы управления», 1967, № 11, с.

95. **Созинов А. И., Котельников А. С.** Глубинная алмазная заточка обдирочных резцов. — «Синтетические алмазы», 1973, № 2, с. 35—36.

96. **Справочник** по алмазной обработке металлорежущего инструмента. Киев, «Техника», 1971. 208 с. Авт.: В. Н. Бакуль, И. П. Захаренко, Я. А. Куникин, М. З. Мильштейн.

97. **Справочник** технолога-машиностроителя. М., «Машиностроение», Т. 2, 1973. 568 с.

98. **Станкостроение** СССР. М., НИИМАШ. Сер. 1, вып. 1, 2, 4, 7, 1970.

99. **Теория** и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин. Тезисы докладов Всесоюзной конференции. М., Изд-во МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1973, 252 с.

100. **Теплопроводность** алмазоносного слоя инструментов на органических связках. — «Синтетические алмазы», 1973, № 6, с. 19—21. Авт.: Т. Д. Оситинская, А. С. Вишневский, В. А. Цендровский, В. Т. Чалый.

101. **Торбило В. М.** Алмазное выглаживание. М., «Машиностроение», 1972, 105 с.

102. **Торбило В. М., Маркус Л. И.** Распад остаточного аустенита при алмазном выглаживании закаленной стали ШХ15. — «Известия вузов. Машиностроение», 1969, № 2, с. 123—126.

103. **Трембовецкий А. Н., Скрипко Г. Ф.** Температура при резке стеклопластика алмазными отрезными кругами. — «Синтетические алмазы», 1973, № 3, с. 41—43.

104. **Уравновешивание** машин и приборов. Под ред. В. А. Щепетильникова. М., «Машиностроение», 1965. 572 с.

105. **Устройство** для статического балансирования шлифовальных кругов. — «Металлорежущий и контрольно-измерительный инструмент», 1968, № 3, с. 26—28. Авт.: М. Я. Старкина, А. С. Рысс, И. А. Гебель, А. И. Нефедов.

106. **Филимонов Л. Н., Киселева Г. А.** Силы резания при круглом наружном шлифовании различных материалов. — «Абразивы», 1969, № 3, с. 27—29.

107. **Филимонов Л. Н., Степаненко В. Г.** Шлифование сталей при повышенных скоростях круга. — «Станки и инструмент», 1973, № 11, с. 35—36.

108. **Филимонов Л. Н., Воронов С. Г., Степаненко В. Г.** Опыт шлифования закаленных сталей со скоростями резания 35—100 м/с. — «Абразивы», 1973, № 3, с. 20—25.

109. **Харитонова М. В., Ривлин И. Я.** О химических свойствах кубического нитрида бора. — «Абразивы», 1968, № 5, с. 8—11.

110. **Худобин Л. В.** Смазочно-охлаждающие средства, применяемые при шлифовании. М., «Машиностроение», 1971. 216 с.

111. **Чекин Г. И.** Алмазное выглаживание закаленных сталей. — «Вестник машиностроения», 1965, № 6, с. 47—49.

112. **Черкашин В. И.** Продольное шлифование. М., «Машиностроение», 1971. 72 с.

113. **Шальнов В. А.** Шлифование и полирование высокопрочных материалов. М., «Машиностроение», 1972. 272 с.

114. **Шероховатость** поверхности пластин ВК20, шлифуемых с высокой скоростью круга. — «Абразивы», 1974, № 4, с. 14—17. Авт.: Н. К. Беззубенко, Н. П. Олейников, Е. В. Красильников, Э. Б. Михайлуца.

115. **Шидарев-Витковский Г. В., Яшин В. А.** Оптический прибор для измерения статического дисбаланса абразивных кругов. — «Абразивы и алмазы», 1966, № 2, с. 3.

116. **Шульман В. К.** Резка технического стекла алмазными кругами. — «Синтетические алмазы», 1973, № 6, с. 56—57.

117. **Экспериментальные** исследования физико-механических и теплофизических свойств алмазоносного слоя. — «Алмазы», 1969, № 3, с. 14—16. Авт.: В. И. Пилинский, В. С. Андреев, В. К. Ляхов, Г. Р. Бородина, Ю. И. Иванов, А. А. Овчинников.

118. **Электроника** и автоматика в абразивной промышленности. Под ред. Б. А. Глаговского. М., «Машиностроение», 1972. 208 с.

119. **Якимов А. В.** Оптимизация процесса шлифования. М., «Машиностроение», 1975. 176 с.

ПРЕДМЕТНЫЙ УКАЗАТЕЛЬ

А

Абразив 3, 4
Абразивная лента 248
Абразивно-алмазная обработка 3
Абразивно-доводочные смеси 239
— головки 63
— сегменты 63
Абразивный круг 61
— материал 4, 9, 23, 61, 69
Адгезионная способность алмаза 12
Активные зерна 111, 113, 114
Алмаз 9-23
— металлизированный 16
— поликристаллический 17
— природный 9-13
— синтетический 13-23
Алмазное сверление 280
— точение 296
— фрезерование 296
Алмазные карандаши 14, 21, 160
— бруски 167
— иглы 162
— резцы 300
— ролики 164
Амплитуда колебаний 256, 271
Анодное растворение 260, 161
Аппрет 248
Аэрозоли 184
Аэростатические направляющие 185
Аустенит 136
— остаточный 136, 137

Б

Базовая величина часовых затрат 359
— бакелизация 93
Бакелит высоковязкий 62
— жидкий 61
— порошкообразный 61
Бактерицидность СОЖ 140, 141
Баланс тепла 126, 250
Балансировка автоматическая 184
— абразивных кругов 78, 83, 84, 85, 184
— алмазных, эльборовых кругов 104
— статическая 82
Баллас 9
— синтетический 16, 17
Барабан ленточный 247
— полировальный 296
— шаровой 61
Бесступенчатая подача 247
Биение круга 168
Бронза 132
Бруски конинговальные 20, 211
— — абразивные 214
— — алмазные 167, 211
— — с механическим креплением 213
— — эльборовые 214
Буровой инструмент 20, 21

В

Величина расходов по заработной плате на заточку инструмента 372
— — по эксплуатации станка, приходящаяся на один инструмент при разных способах обработки 372
— — капитальных вложений на внедрение абразивной или алмазной обработки 368
Вибрация 131, 153, 276, 283
Виброабразивная обработка 268
Вибромеханическая обработка 276
Вибротермомеханическая обработка 272
Виброустойчивость 181
Воздушный поток около круга 184
Волнистость 152, 153, 156, 168, 327
Время операции 180
— основное 180
Выбор базы для сравнения показателей экономической эффективности 368
— оборудования при оценке вариантов новой техники 360
Вылет алмаза в державке резца 306
Вулканизатор камерный 63
— тупельный 63
Выглаживание 237, 318
— бронзы 320
— дюралюминия 320
— стали 320
— чугуна 320
Выглаживающий инструмент 318
— — алмазный 318

Г

Газопроницаемость абразивных кругов 75, 76
Гексанит 19
Геометрия алмазных резцов 296
Гигиеничность СОЖ 140
Гидроциклон 184
Главное движение при шлифовании 31
Глина огнеупорная 61
Глубина лунки 69
— шлифования 112, 130, 251
Глубинное шлифование 180, 193
Годовой экономический эффект 360, 367, 368, 369, 370, 371, 378
Головка конинговальная 223, 224, 225
Гранат 4, 8

Д

Давление 251
Действительный годовой фонд времени работы металлорежущих станков 369
Декстрин 61
Дефекты алмазов 14
Деформация 129
Динамическая активизация потока СОЖ 152
Дисбаланс круга 79—83
Диски правящие 163
— абразивные 193
Диффузионная способность алмаза 12
Доводка 19, 22, 86, 193, 237, 246
— ленточек 196
— полумеханическая 236
— резцов из эльбора 305
— фасок 196
Доводочная смесь 238

Ж

Жесткость станка 181

З

Закалка 136
Заточка 3, 86, 193, 246
— алмазно-выглаживающего инструмента 323
— глубинная 187
— инструментов из быстрорежущей стали 196
— резцов из эльбора 305
— твердосплавных инструментов 197, 199
— упругая 200, 201, 325
Затраты, входящие в технологическую себестоимость 357
— изменяющиеся 357
— на брак продукции 365
— на заработную плату основного рабочего 357

— на инструмент 364
— неизменяющиеся 357
— по обрабатываемым изделиям повышенной точности, надежности и долговечности
— по технологической оснастке 361, 363
Затылование 194
Зерна абразивные 4, 69
— активные 111, 113, 114
— алмазные 13, 15
— кубического нитрида бора 18
— кубонита 18
— металлизированные 18
— эльбора 18
Вернистость абразивных материалов 23-28
— алмазов 15, 28
— алмазных кругов 93
— — кубонитовых кругов 93
— — эльборовых кругов 93
Вернового состава расчет 28

И

Иглы алмазные 161
Изготовление кругов 61-63
Измерение температур 127, 308
Износ 129, 152, 156, 161, 169, 188, 310, 311, 312, 313, 321
— минутный 189
— размерный 152, 158
— удельный 152, 153, 197
Индивидуальные коэффициенты затрат на оборудование 361, 362, 363
Интенсивность съема 200
Инструменты алмазные 14
Исмит 19
Испытания брусков 76
— кругов 213

К

Капитальные вложения в мероприятия по абразивной и алмазной обработке 369
— — в оборудование 369
— — в приспособления 363, 369
Карандаш алмазный 14, 21, 160
Карбид бора 5, 8
— кремния 5
— — зеленый 5, 8, 61, 69, 122
— — черный 5, 8, 61, 69
Карбонадо 9, 16, 17, 21
— дробленые 21
Класс точности абразивного круга 76
Кожух 184, 350
Количество активных зерен 111
— вершинок зерен в единице объема шлифовального инструмента 109
— работающих зерен 111
Контактная выносливость 330
Концентрация алмазов 93, 109, 111, 260
Копир 246
Корунд 4, 8
Коэффициент затупления 200
— изменения стойкости инструмента 372
— изменения числа переточек 372
— износа круга при правке 169
— линейного расширения 133
— потери съема 129
— режущей способности круга 156
— трения алмаза по стали 12
— трения царапания 322
Коэффициенты часовых затрат 356, 361
— — приведенных затрат 356
— — приведенных затрат на эксплуатацию рабочего места 359, 361
Кремний 20
Кремень 4, 8
Крепление кругов 339, 340, 341
Кристаллическая решетка алмаза 10
Критерий затупления алмазных резцов 311
Критическая глубина заделки зерен 110
Кромки зерен 16, 108
Круг шлифовальный 19, 31, 61, 63, 185
— алмазный 88—108
Круг шлифовальный 19, 31, 61, 63, 185
— для скоростного шлифования 66, 181, 185
— кубонитовый 88
— отрезной 20, 62
— прерывистый 67, 92, 181
— сегментный 181
— с упрочняющими кольцами 67
— тарельчатый 197
— эльборовый 88, 105—108
Круга рабочий слой 108
— рабочая поверхность 108
Круги для скоростного шлифования 185
— глубинного шлифования 185
Крутящий момент при сверлении 283
Кубический нитрид бора 11, 17, 18
— — — поликристаллический 19
Кубонит 3, 18, 22

Л

Латунь 253, 255
Лента шлифовальная 22, 246
— бесшовная 250
Ленточное шлифование 246
Ленточный барабан 247
Люминесценция алмазов 12

М

Магнитное поле 279
Магнитные сплавы 20
Магнитовиброабразивная обработка 272
Магнитноабразивное полирование 276
Магнитный сепаратор 184
Маркировка абразивного круга 76
Марки синтетических алмазов 13
Масса формовочная 61
— неуравновешенная 80
Материалы абразивные 4
Машина смесительная вертикально-шнековая 62
— — планетарная 62
Машинное время 181
Машинокоэффициенты 356
— для шлифовальных станков 358
Мебиуса лист 250
Медь 143, 150, 252, 253, 255
Метод коэффициентов затрат 356
Методы укрупненного расчета экономического эффекта 377, 378
Методика расчета экономического эффекта 371, 372, 373, 374, 375—377
Мешалка 61
Микронеровности 131, 247, 134, 245, 265, 327
Микропорошки абразивные 61, 238
— алмазные 15, 28—30, 92
— эльборовые 92
Микротвердость 133, 136, 245, 271
Минералокерамика 11
Минутный съем 172
Модуль упругости алмаза 10, 11
Монокорунд 6—8
Мощность шлифования эффективная 156
— электролитического шлифования 264

Н

Наждак 4, 8
Накатные ролики 167
Наклеп 271
Наполнитель 62, 94
Направляющие аэростатические 185
Напряжения 133, 135, 250, 271

Нарост 305
Натяжение ленты 251
Некруглость 153, 235
Неуравновешенность круга 79, 80, 131, 148, 153
Номинальная поверхность контакта круга с деталью 108, 109
Номинальное количество зерен в единице объема шлифовального инструмента 109
— — вершинок зерен в объеме рабочего слоя круга, расположенном над единицей поверхности связки 109

О

Обжиг 62
Обобщающий показатель оценки результатов внедрения синтетических алмазов и других сверхтвердых материалов 371
Обрабатываемость крупких неметаллических материалов 287
Обработка неметаллических материалов 288
— полупроводниковых материалов 294
Общая (абсолютная) экономическая эффективность 370
— сумма затрат на заточку и доводку инструмента 372
Общий коэффициент изменения сроков службы инструмента 372
Овальность 235
Ограничения технические 170, 171
Огранка 327
Ожидаемый экономический эффект на основе усредненных показателей экономического эффекта 377
Окисные пленки 237
Оправки раздвижные 343
— с гидропластовым зажимом 344
Оптимизация 3
Ориентированные зерна 249
Осевая сила при сверлении 283
Основа шкурки 248, 249
— — капроновая 250
— — тканевая 248
— — *шифонная 250*
Остаточные напряжения 133, 136, 328, 329
Отверстие круга крепежное 67
— посадочное 67
Отдельчно-упрочняющая обработка 318
Отклонения предельные наружного диаметра кругов 77
— — диаметра посадочного отверстия круга 77
— — размеров абразивного сегмента 77
Относительная экономия условно-постоянной части накладных расходов 370
Очистка лент 251

П

Пассиваторы 140
Паста 237
— алмазная 22, 238
Патрон инерционный 344
— для установки зубчатых колес 345
— магнитный 346
— мембранный 345
— с гидравлическим зажимом 344
Период стойкости 156
Перлит 61
Пилы сегментные 20
Пленки окисные 237
Плита гидравлическая 62
Поверхность детали обрабатываемая 108
— — обработанная 108
— контакта круга с деталью 108
— круга условная наружная 108
— — рабочая 108, 156
Поверхностно-активное вещество (ПАВ) 140
Полевой шпат 61
Полирование 22, 246, 251, 252
— полупроводников 295
Поводок 342
Подача 31
— бесступенчатая 247
— на врезание 247
— под углом 26
— *поперечная* 31, 112
— продольная 31, 112, 251
Порошки абразивные 4
Правка 20—23, 152, 156, 160
— автоматическая 14
— методом обтачивания 162
— — накатывания 167
— — тангенциального точения 167
— — шлифования 164
Правящий инструмент 160
Пресс гидравлический 61, 62
— механический 61, 62
Прибор пескоструйный 62
— активного контроля 181
Притир 238
Пористость абразивного круга 69
Потребность предприятия в синтетических алмазах 371, 377
— — в инструменте после перехода на алмазную заточку и доводку 372
Предел текучести 133
Прерывистые абразивные круги 67
— алмазные круги 92
Приведенная экономия 360
Прижог 133, 136, 200
Припуск 176, 181, 239
— на доводку 242
Прирост прибыли предприятия 371
Притиры 241
Производительность 172, 181, 254
— идеальная 186
— обработки керамики 292
— относительная 186
— сверления 285
— удельная 112
— ультразвукового сверления 287
— хонингования 219
Прочность алмаза 11, 14, 18
— эльбора 18
Пульвербакелит 62, 74

Р

Работоспособность алмазных кругов 103, 104
Размеры зерен 23
Разрушение воздушного потока 184
Распределение размеров зерен 27
Растворение анодное 260, 261
— электрохимическое 260
Расход алмазов 282
— кругов 158, 169
— — удельный 189
Расчет режимов шлифования 170
— — алмазной обработки 368
— температур 117, 308
— технологической себестоимости 365, 366, 367
Расчетное количество оборудования 369
Режимы доводки 243
— отделочно-упрочняющей обработки 332 336, 337
Режимы правки 161
— шлифования высокопрочных и жаропрочных сталей 173, 179, 180
— — быстрорежущих сталей 174, 194
— — инструментальных сталей 177
— — конструкционных сталей 177
— — легированных сталей 175

— — твердых сплавов 175, 176, 178, 196
— — титановых сплавов 179, 174, 180
— — чугунов 174
Рекомендации по выбору абразивных кругов 86, 87, 131, 133
— — — алмазных кругов 105, 106, 107, 108, 131, 132
— — — ленты 250 — 256
— — — правки 162—169
— — — режимов ленточного шлифования быстрорежущих сталей 194, 196
— — — СОЖ 141, 143—145
— — — хонингования 219
— — — электролитического шлифования 261
Резание алмазными резцами 305
— — — алюминиевых сплавов 312
— — — жаропрочных сплавов 315
— — — меди 315
— — — стали 307
— — — стеклопластика 312
— — — стеклотекстолита 312
— — — титановых сплавов 315
— — — труднообрабатываемых материалов 306
— — — чугуна 315
Резка пенопласта 291
— пластмасс 291
— стеклотекстолита 291
Резцы алмазные 14, 296, 298
— из эльбора-Р 296
— подрезные 298
— проходные 298, 300
— — с механическим креплением 302
— расточные 298, 300
— резьбовые 298
Ролики алмазные 164, 165
— поджимные 246
— правящие 162

С

Самозатачивание 152
Сверление 20
— бетона 282
— минералокерамики 288
— ситаллов 288
— рубина 288
— стекла 282, 288
— — кварцевого 288
— — технического 288
— стеклокварца 288
— технического фарфора 288
— ультразвуковое 286
— — алмазное 287
Сверления режимы 282
Сверлильная головка 281
Сверло
— алмазное 20—22, 280
— — игольчатое 280
— — кольцевое 22, 280
— — сегментное 280, 281
Сверхтвердые материалы 13, 17, 19
Свойства теплофизические алмазных слоев 101
— эльбороносных слоев 101
Связка алмазных кругов 93—100
Связка круга бакелитовая 69, 74, 87
— вулканитовая 62, 69, 74, 87
— глифталевая 61, 74, 87
— каучукосодержащая 250
— керамическая 20, 61, 69, 74, 87, 93, 99
— металлическая 20, 93, 96
— абсидановая 61
— органическая 19, 20, 61, 93, 95
— перлитовая 61
— поливинилформалевая 61, 74
— эпоксидная 61
Себестоимость годового объема обработки изделий с учетом затрат на брак 365
— машино-часа базового станка 357
— обработки абразивным и алмазным инструментом 356
— станочных приспособлений 364
— суперфиниширования 237
Силы резания 115—117, 130, 191, 221, 263, 306, 313
— — при скорости шлифования 190
— — при электролитическом шлифовании 263
Система СПИД 129, 130, 291
Системы автоматического управления (САУ) 130
— — регулирования (САР) 130
Сколы 200
Скорость детали 31, 112, 170
— шлифования 31, 112, 153, 157, 170, 186, 187, 251, 317
Славутич 19, 23
Смазочно-охлаждающие жидкости (СОЖ) 130, 140, 147, 148, 149, 150, 151, 180, 191, 222, 235, 305
Смесь доводочная 238
Сопротивление межэлектродное 260
Способы расчета технологической себестоимости операций 356
Срок окупаемости капитальных вложений 371
Сталь 20, 157, 178, 252, 255
— автоматная 174
— быстрорежущая 20, 121, 123, 132, 137, 138, 154, 157, 186, 187, 194
— высокопрочная 158, 174, 179, 180
— жаропрочная 23, 154, 179, 180
— закаленная 23, 123, 125, 132, 176, 191
— конструкционная 132, 143, 150, 154, 174
— легированная 143, 145, 150, 151, 154, 175
— незакаленная 124, 125, 157, 176
— углеродистая 143, 145, 150, 154
— цементуемая 174
Станки бесцентрово-шлифовальные 183
— внутришлифовальные 183
— для глубинного шлифования 184
— для испытания кругов 348
— для скоростного и силового шлифования 183
— заточные 184
— круглошлифовальные 183
— профилешлифовальные 193
— резьбошлифовальные 184
— фрезерные 185
Стекло 7, 8, 20, 144, 145, 150, 151
— борное 61
— щелочное 61
— щелочноземельное 61
Стойкость алмазного резца 310
— выглаживающего инструмента 320
— круга 63, 152, 156
— ленты 247, 251
— — при скоростном шлифовании 188
— режущего инструмента 372
Строчка
— поперечная 247
— продольная 247
Структура абразивного круга 69
Сульфофрезол 180
Субмикропорошки 30
Суммарная экономия от внедрения алмазной заточки и доводки инструментов 373
Суперфиниширование 227, 233
— инструментальной стали 229
— керамики 229
— стали 229
— твердых сплавов 229
— цветных сплавов 229
— чугуна 229
Суспензии 140, 238

Сферокорунд 6, 8
Съем 186, 261, 327
— минутный 172
— при виброабразивной обработке 270
— удельный 180
— фактический 187

Т

Тальк 61
Твердый сплав 11, 19—23, 118, 120, 128, 132, 134, 145, 151, 155, 159, 175 193, 197, 199, 255
Твердость алмаза 10, 11
— брусков 219, 329
— кругов 61, 69, 72, 73, 74, 87, 192, 196
— кубического нитрида бора 11
Текстура 133
Температура 18, 94, 115, 129, 133, 136, 184, 245, 282, 308, 333
— измерения 127, 308
— контактная при скоростном шлифовании 191
— поверхности контакта зерна с деталью 117, 123, 135, 308
Теплопроводность 117, 308, 309
— алмаза 10
— кругов 75
Теплофизические свойства алмазоносного слоя 101
— — кругов 94
— — связок 101
Термопара 127
— искусственная 127
— полуискусственная 127
Техника безопасности 347
Технологическая себестоимость обработки 356
— — операции при применении метода коэффициенто-машино-часа 356
Технология изготовления абразивных кругов 61
Типаж абразивных лент 248
— — кругов 63—66
— — головок 63, 68
— алмазных кругов 88, 89, 90, 91
— — головок 88, 91
— сегментов 63, 70, 71
— конинговальных брусков 213
— — — алмазных 212
— — для суперфиниширования 321
Титановые сплавы 143, 150, 154, 158, 174, 179, 180, 252, 254, 255
Точность 129, 152, 165, 212, 221, 235
— при скоростном шлифовании 188
Транспортировка абразивного круга 76
Требования к абразивным кругам 76
— к абразивным шкуркам 249
— к алмазным кругам, головкам 100, 101, 102
— к кубонитовым кругам, головкам 100, 101, 102
— к эльборовым кругам, головкам 100, 101, 102
Трещины 200
Трудоемкость суперфиниширования 237

У

Угол сетки при суперфинишировании 233
Удельная производительность 112, 113
Удельные капитальные затраты 369
Упаковка абразивного круга 76
Упрочнение кругов 66, 67
— поверхностного слоя 245, 328
Ультразвуковая обработка алмазная 287
— — свободным абразивом 287
Уравновешенность круга 61, 62, 78—82
Усредненные показатели экономической эффективности 377
Устойчивость зерен 110

Ф

Фазовые превращения 133, 245
Фасонная поверхность 247
Физико-механические свойства абразивных кругов 67, 75
— — алмазных кругов 99
— — алмазов 10, 11, 16
— — кубического нитрида бора 11, 17
— — сферокорунда 7
— — эльбора 12
Форма зерен абразивных 23
— — алмазных 23, 28
Фракции зернистости 23
Фрезы, оснащенные кристаллами алмаза, дисковые 299, 312, 313, 316
— торцовые 299, 302, 303, 304

Х

Характеристика абразивного круга 63
Химические свойства алмаза 10, 11
— — кубического нитрида бора 17, 18
Хон 311, 321
Хонингование 3, 9—22, 211—227
— алмазное 3
— алюминиевых сплавов 215, 217, 219, 220
— бронзы 219
— стали закаленной 215, 218, 220
— — незакаленной 215, 217, 218, 220
— — улучшенной 215, 216
— крома 215, 217, 220
— чугуна 215, 216, 218, 220
Хранение абразивных кругов 76

Ш

Шаржирование 245
Шарошки 162
Шеллак 219
Шероховатость 131, 187, 212, 229, 237, 240, 255, 265, 270, 305, 313, 327
Шкурка 248
Шлам 259
Шлифовальные зерна 61
Шлифование
— бесцентровое 32, 37—41
— вибрационное 276
— внутреннее 41—46
— в патроне 32
— врезное 36, 63
— в центрах 32—37
— глубинное 32, 33—37, 41, 181
— зубьев 52, 55, 56
— керамики 288
— комбинированное 86
— круглое 31
— — наружное 32—41
— ленточное 246
— многопроходное 31—50
— однопроходное 33—50
— отделочное 86
— планетарное 45, 46
— плоское 31, 41
— — периферией круга 41, 47—49
— получистовое 20, 22
— профильное 52
— резьбы 52—54
— силовое 152, 180
— скоростное 62, 152, 180
— стекла 289
— сферы 52, 56—58
— торцом круга 41, 49—51
— установленным кругом 32, 33—37, 41

— фарфора 288
— фасонное 52, 59, 60
— чистовое 19, 22, 86, 180
— электрохимическое 136, 257
Шлифпорошки 61, 92

Ц

Целевые функции 171
Центр динамометрический 116
Центрифуга 184
Цикл суперфиниширования 233

Щ

Щелок сульфитный 61

Ч

Часовые затраты 357—360
— — по эксплуатации рабочего места 359
— — приведенные 359, 360
Частота вращения круга 31
Частота колебаний 256
Чугун 124, 125, 132, 135, 144, 145, 150, 151, 154, 174, 176, 252

Э

Эксцентриситет 324
Электрокорунд 5, 61, 185
— белый 6, 8, 11, 86
— нормальный 5, 8, 86
— титанистый 6, 8, 86
— циркониевый 6, 8, 86, 185
Экономическая оценка эффективности абразивной и алмазной обработки 367
Экономический эффект 360
— — от внедрения абразивной или алмазной обработки 369
— — отнесенный к одному карату израсходованных алмазов 371, 377
Экономия затрат по инструменту за счет повышения стойкости кругов 375
— затрат по заработной плате заточника 375
— от внедрения алмазной заточки и доводки инструмента 373
— от применения при обработке деталей инструмента, заточного и доведенного алмазами 373
— от сокращения расходов по заточке инструмента 372
— от сокращения расходов, связанных с работой заточного оборудования 375
— от увеличения срока службы инструмента 372
— по инструменту повышенной стойкости 375
Электролит 257, 258
Электропроводность удельная 259
Электрохимическая виброабразивная обработка 272
Эльбор 3, 22
Эмульсии 140
Эмульсол 140, 142
Этапы расчета экономической эффективности 371, 372
Эффективность абразивно-алмазной обработки 367

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие 3

Глава 1. Материалы, применяемые для изготовления абразивного и алмазного инструмента 4

§ 1.1. Абразивные материалы (канд. техн. наук В. А. Рыбаков) . . . 4
§ 1.2. Алмазы и другие синтетические сверхтвердые материалы (канд. техн. наук А. В. Гордеев) 9
§ 1.3. Форма и размеры зерен абразивных и алмазных порошков (канд. техн. наук доц. Г. М. Гаврилов) 23

Глава 2. Шлифование абразивами и алмазными кругами 31

§ 2.1. Технологические разновидности процесса шлифования (канд. техн. наук. доц. А. В. Гордеев и инж. Н. В. Будник) 31
§ 2.2. Абразивные круги (канд. техн. наук доц. В. И. Пилинский, канд. техн. наук Н. П. Згонник) 61
§ 2.3. Алмазные, эльборовые и кубонитовые круги (канд. техн. наук доц. В. И. Пилинский) 88
§ 2.4. Процесс резания при шлифовании абразивным и алмазным инструментом (д-р техн. наук проф. А. Н. Резников, инж. О. Б. Федосеев, инж. В. В. Щипанов) 108
§ 2.5. Силы резания, мощность и температура при шлифовании (д-р техн. наук проф. А. Н. Резников, канд. техн. наук доц. А. В. Шеин) 115
§ 2.6. Качество поверхностей при абразивном и алмазном шлифовании (канд. техн. наук доц. В. И. Пилинский, инж. В. В. Щипанов) 128
§ 2.7. Смазочно-охлаждающие жидкости при шлифовании (д-р техн. наук проф. Л. В. Худобин) 140
§ 2.8. Износ и стойкость кругов (канд. техн. наук доц. Л. Н. Филимонов) 152
§ 2.9. Правка кругов и правящий инструмент (канд. техн. наук доц. В. И. Муцянко) 160
§ 2.10. Режимы абразивного и алмазного шлифования (д-р техн. наук проф. А. Н. Резников, канд. техн. наук доц. Ф. П. Урывский) 169
§ 2.11. Скоростное, силовое и глубинное шлифование (канд. техн. наук доц. В. И. Пилинский, инж. С. В. Николаев) 180
§ 2.12. Заточка и доводка режущего инструмента (канд. техн. наук В. Л. Белостоцкий) 193

Глава 3. Отделочная абразивная и алмазная обработка и ленточное шлифование 211

§ 3.1. Хонингование (д-р. техн. наук И. Е. Фрагин) 211
§ 3.2. Суперфиниширование (канд. техн. наук З. И. Кремень) 227

§ 3.3. Доводка (канд. техн. наук З. И. Кремень) 237
§ 3.4. Ленточное шлифование (инж. Е. И. Алексенцев, инж. О. Б. Федосеев) 246

Глава 4. Некоторые специальные виды абразивной и алмазной обработки 257

§ 4.1. Электролитическое абразивное и алмазное шлифование (д-р техн. наук проф. А. Г. Саркисов, канд. техн. наук Ю. П. Буроч-кин) 257
§ 4.2. Виброабразивная и магнитно-абразивная обработка (канд. техн. наук доц. В. И. Пилинский, канд. техн. наук Ф. Ю. Сакулевич) 268
§ 4.3. Алмазное сверление (канд. техн. наук доц. Г. Г. Яшин, канд. техн. наук И. С. Ногин) 280
§ 4.4. Обработка неметаллических материалов (канд. техн. наук доц. В. И. Пилинский, канд. техн. наук К. И. Русаков) 288

Глава 5. Точение и фрезерование алмазом, эльбором-Р и другими сверхтвердыми материалами 296

§ 5.1. Геометрия режущих кромок и конструкции резцов и фрез (д-р техн. наук проф. М. Ф. Семко, д-р техн. наук проф. А. Н. Резников, канд. техн. наук доц. В. П. Зубарь, канд. техн. наук доц. В. И. Дрожжин) 296
§ 5.2. Процесс резания при точении и фрезеровании алмазами и другими синтетическими сверхтвердыми материалами (д-р техн. наук проф. М. Ф. Семко, д-р техн. наук проф. А. Н. Резников) 305
§ 5.3. Режимы резания при точении и фрезеровании алмазами и эльбором (д-р техн. наук проф. М. Ф. Семко, канд. техн. наук доц. В. П. Зубарь, канд. техн. наук доц. В. И. Дрожжин) 314

Глава 6. Отделочно-упрочняющая обработка деталей алмазом и другими сверхтвердыми материалами 318

§ 6.1. Инструмент для выглаживания (канд. техн. наук доц. Я. И. Барац) 318
§ 6.2. Методы выглаживания алмазным инструментом (канд. техн. наук доц. Я. И. Барац) 324
§ 6.3. Качество и точность деталей при отделочно-упрочняющей обработке (канд. техн. наук доц. Я. И. Барац) 327
§ 6.4. Режимы отделочно-упрочняющей обработки алмазным инструментом (канд. техн. наук доц. Я. И. Барац) 332

Глава 7. Краткие сведения об оборудовании и наладке при абразивной и алмазной обработке 332

§ 7.1. Оборудование для абразивной и алмазной обработки (канд. техн. наук М. В. Гомельский) 338
§ 7.2. Техника безопасности (канд. техн. наук М. В. Гомельский) . . 347

Глава 8. Методика экономической оценки эффективности при абразивной и алмазной обработке 356

§ 8.1. Расчет себестоимости обработки абразивным и алмазным инструментом (канд. экон. наук Н. М. Мурахтанова, канд. техн. наук А. В. Гордеев) 356
§ 8.2. Экономическая оценка эффективности абразивной и алмазной обработки (канд. экон. наук Н. М. Мурахтанова, канд. техн. наук А. В. Гордеев) 367
Некоторые частные случаи определения экономической эффективности внедрения абразивной и алмазной обработки 371
Методы укрупненного расчета экономического эффекта от внедрения алмазной обработки изделий 377

Список литературы 379

Предметный указатель 384

Djvu версию подготовил Семенюк Д.Ю.